



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

대면적 공정을 위한  
자화 유도 결합 플라즈마 장치의 설계 및  
공정 특성에 관한 연구

Design of a Magnetized Inductively Coupled Plasma Reactor  
for Large Area Plasma and a Study on Its Process Characteristics

2014년 2월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터 공학부

정 희 운

공학박사학위논문

대면적 공정을 위한  
자화 유도 결합 플라즈마 장치의 설계 및  
공정 특성에 관한 연구

Design of a Magnetized Inductively Coupled Plasma Reactor  
for Large Area Plasma and a Study on Its Process Characteristics

2014년 2월

서울대학교 대학원  
전기 · 컴퓨터 공학부  
정 희 운

대면적 공정을 위한  
자화 유도 결합 플라즈마 장치의 설계 및  
공정 특성에 관한 연구

Design of a Magnetized Inductively Coupled Plasma Reactor  
for Large Area Plasma and a Study on Its Process Characteristics

지도교수 황 기 응

이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2014년 02월

서울대학교 대학원

전기 · 컴퓨터 공학부

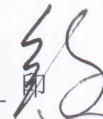
정 희 운

정희운의 공학박사 학위논문을 인준함

2014年 02月

委員長

김 곤 호



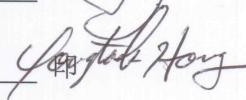
副委員長

황 기 응



委 員

홍 응 택



委 員

신 경 섭



委 員

이 석 현



## 국문 초록

반도체 소자의 집적도는 점점 증가하고, 직경 450mm 의 wafer 를 양산에 적용해야 하는 시점이 다가옴에 따라서 차세대 식각 장치가 갖추어야 할 기본적인 조건들이 점차 까다로워지고 있다. Wafer 의 전체 면적은 기존 대비 2배 이상 증가하였음에도 플라즈마 밀도의 균일도는 5% 이하를 유지해야 하며 안정적인 방전 특성은 물론 생산성 측면에서는 일정 수준 이상의 etch rate 도 보장해야 한다. 또한 용도와 목적이 다른, 혹은 다양한 AR (Aspect Ratio) 를 가지는 미세 pattern 을 식각하면서 발생할 수 있는 RIE lag 에 대해 적절하게 제어할 수 있어야 한다. 이와 관련하여 높은 성능을 가지는 플라즈마 식각 장치가 개발되었거나 개발 중인데, 그 중에서도 자화된 유도 결합 플라즈마 장치 (M-ICP) 는 기존의 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치에 약한 세기의 자기장을 인가하는 매우 간단한 방법으로 초고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있음은 물론 물질의 높은 etch rate 을 보장할 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 장치의 특성 관점에서, 플라즈마 밀도를 극대화하고 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도를 확보할 수 있는 자기장의 최적화된 공간 분포에 대한 연구가 아직은 부족한 실정이다. 또한 식각의 관점에서도, 100nm 미만의 폭을 가지는 초미세 pattern 의 etch rate 및 selectivity 특성에 관한 연구나 다양한 top CD 를 가지는 pattern 을 식각하면서 생길 수 있는 RIE lag 현상에 대해 심도 있게 연구가 이루어진 바가 없다.

본 논문에서는 ICP 장치에 복수의 전자석을 matching box 하단부, RF window 하단부, substrate 근처, TMP (Turbo Molecular Pump) 등 4곳에 설치하여 M-ICP 장치를 구성하고 대면적 공정의 관점에서 식각 환경에 최적화된 자기장의 공간 분포를 모색한 일체의 연구 결과에 대하여 소개하고자 한다. 먼저 시스템의 전체적인 구조 및 dimension 에 근거하여 설치될 전자석의 적정 반경 및 copper coil 의 감김 횟수 등을 개략적으로 설계해 보았다. 그리고 이론적으로는 Biot-Savart law 에 근거하여, 실험적으로는 FEMM 이라는 무료 배포용 소프트웨어를 활용하여 전자석의 각 부분에 일정 크기의 전류를 모두 시계 방향 (시스템 위에서 보았을 때의 인가 방향) 으로 인가하였을 때 substrate 중심에 인가되는 자기장의 세기와 substrate 중심으로부터 반경 방향 혹은 수직축 방향 (혹은 Substrate 중심으로부터의 수직 거리가 증가하는 방향) 으로 형성되는 자기장의 공간적인 분포를 예측해 보았다. 그리고 실제 전자석을 제작 및 설치한 후 비슷한 조건에서 실험한 결과가 예측한 결과와 매우 잘 맞아 떨어짐을 확인할 수 있었다.

그 다음, 구성한 M-ICP 장치를 바탕으로 대면적 공정에 최적화된 자기장의 공간 분포를

모색하기 위하여 각 전자석에 인가되는 전류의 방향 및 세기 등을 다양하게 바꾸어 보았다. 이론적으로는 플라즈마의 flute instability 를 억제하고 R-wave 가 process chamber 내부로 잘 전파할 수 있도록 하며 plasma confinement 효과를 극대화하기 위해 substrate 중심으로부터 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 자기장의 세기가 증가하는 것이 바람직하다고 여겨지는데, 이러한 공간 분포는 TMP 부근에 위치한 전자석에 인가되는 전류를 반시계 방향 (시스템 위에서 보았을 때의 인가 방향) 으로 인가하여 형성할 수 있다. 이 밖에도 전자석의 적절한 제어를 통해 반경 방향 혹은 수직축 방향에 대한 자기장의 공간 분포를 7가지 정도로 (case 1 ~ case 7) 다양하게 조성해본 후 DLP (Dual Langmuir Probe) 를 활용하여 플라즈마 특성을 진단한 결과, 예상대로 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 자기장의 세기가 증가할 때 플라즈마 밀도가 가장 높고, 플라즈마 밀도의 반경 방향에 대한 균일도가 높아 대면적 공정에 최적화된 환경을 조성할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 식각 환경에 최적화되었다고 여겨지는 case 7 에 대하여 압력별로 플라즈마 밀도 및 전자 온도, 플라즈마 밀도의 균일도 등을 2차원적으로 측정하였고 M-ICP 장치가 ICP 장치 대비 플라즈마 밀도가 높고 플라즈마 밀도의 균일도도 우수함을 확인할 수 있었다. 전자 온도의 경우 M-ICP 장치 chamber 내부로 깊숙이 침투한 R-wave 에 의한 electron heating 의 영향으로 M-ICP 장치가 ICP 장치 대비 다소 높았으나, R-wave 의 침투가 이루어지지 않은 substrate 근처에서는 전자 온도가 거의 비슷하거나 약간 높은 경향성을 보였다.

또한, 본 논문에서 구성한 M-ICP 장치가 실제로 ICP 장치를 포함한 기타 식각 장치 대비 대면적 공정에 유리한 식각 환경을 조성할 수 있는지 살펴보기 위해 top CD 가 90, 110, 130, 160, 200nm 로 다양하게 분포하고 있는 산화물 기반의 HARC pattern 을 식각하는 실험을 진행하였다. 기본적으로는 ICP 장치 대비 M-ICP 장치에서의 ACL 및 oxide etch rate, Oxide-to-ACL selectivity 특성이 어떻게 나타나는지 살펴보았으며 특히 bias frequency, magnetic flux density, gas pressure, bias power, source power, gas ratio 등의 다양한 process parameter 에 따라 profile 의 형상 (특히 식각이 진행됨에 따른 Top, bowing, bottom CD 의 변화 관점에서) 이나 RIE lag 특성이 어떻게 달라지는지 자세히 연구하였다. 그 결과 M-ICP 장치에서 식각한 샘플의 oxide etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 ICP 장치 대비 높을 뿐만 아니라, magnetic flux density, gas pressure, bias power 등의 제어를 통해 RIE lag 를 약 6% 미만의 수준까지 크게 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 DLP 및 SLP 를 활용하여 플라즈마 밀도, 전자 온도 및 EEPF (Electron Energy Probability Function) 등을 측정하고 actinometric optical emission spectroscopy (A-OES) 를 활용하여 process parameter 에 따른 공간 내 radical 분포 특성을 살펴 보았으며 ion energy analyzer

(IEA) 를 활용해 ion energy distribution 및 ion flux 등을 파악해 봄으로써 M-ICP 장치가 보여주는 일체의 식각 특성에 대해 보다 정확하게 이해할 수 있었다. 궁극적으로는 M-ICP 장치가 대면적 공정에 유리할 뿐만 아니라 자기장과 압력의 조절을 통해 공정 제어를 원활하게 할 수 있음을 알 수 있었다.

플라즈마를 이용하는 대표 기술이 반도체 분야에서는 건식 식각 공정이라면 디스플레이 분야에서는 PDP (Plasma Display Panel) 라고 할 수 있다. PDP 는 플라즈마 방전에 의해 생성된 VUV 가 형광체를 여기하여 가시 광선을 방출하는 자발광 소자로서 대형화가 용이하고 시야각이 매우 넓다. 1964년 미국 일리노이 대학에서 발표한 플라즈마 표시 장치가 오늘날의 AC PDP 의 시조이며 이후 본격적인 연구 개발을 통해 1990년대 초반 일본 기업에서 상품을 출시하기 시작하였다. 그리고 1990년대 후반부터는 한국 기업들도 PDP 시장에 진출하여 일본 기업들과 치열한 시장 경쟁을 벌여 나갔다. 2010년 이후에는 중국의 Haier 社 도 PDP TV 개발에 지속적으로 투자해오고 있다. 그러나 안타깝게도 LCD, OLED TV 와의 경쟁에서 우위를 점하지 못하여 전체적인 PDP TV 시장 규모는 점차 줄어들고 있는 추세다. 결국 2013년에는 일본의 대표적인 PDP TV 생산 업체인 Panasonic 社 가 PDP 시장에서 철수하였고 현재는 한국의 삼성 SDI 와 LG 전자가 중국 기업의 추격 속에 PDP TV 시장을 이끌고 있다.

PDP 가 디스플레이 시장에서 우수한 경쟁력을 확보하기 어려운 이유는 여러 가지 장점에도 불구하고 타 디스플레이 소자 대비 전력 소모량이 높기 때문이다. 더군다나 U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 는 가전 제품의 전력 소비량을 해마다 더 엄격하게 규제하고 있는 실정이다. 그러나 최근 몇 년간 2차 전자 방출 계수가 높은 신 보호막의 적용을 통해 PDP 의 발광 효율을 획기적으로 개선한 연구 결과들이 발표되면서 그간 지적되어 온 전력 소모 문제를 해결할 돌파구를 마련할 수 있게 되었다. 다만 그간의 연구가 방전 효율 개선에 집중되다 보니 신 보호막을 적용한 PDP 의 구동 특성에 대한 연구가 제대로 이뤄지지 않았다. 하지만 영화 ‘아바타’ 를 계기로 3D PDP 의 보급이 확대되면서 발광 효율 뿐만 아니라 PDP 의 response time 을 단축시키는 것도 주요 화두로 부각되고 있는 만큼, 신 보호막을 적용한 PDP 의 구동 특성은 자세히 연구해 볼 필요가 있다. 따라서 본 논문을 통해 신 보호막을 적용한 PDP 의 구동 특성을 자세히 다루어 보았고 이에 더하여 PDP 의 address discharge time lag 를 개선하기 위한 새로운 파형 설계에 집중하였다. 그 결과, 신 보호막을 PDP 에 적용하여 방전 전압은 40V 이상 낮추고 발광 효율은 40% 이상 개선하면서도 제안된 파형을 이용하여 address discharge time lag 를 550ns 이상 단축할 수 있었다. 또한 장시간의 방전을 통해 확인한 수명도 신 보호막을

적용한 PDP 가 기존의 MgO 를 적용한 PDP 대비 동등 이상 수준인 것으로 나타났다.

**주요어** : 플라스마 밀도, 전자 온도, DLP (Dual Langmuir Probe), R-wave, ICP (Inductively Coupled Plasma), M-ICP (Magnetized ICP), HARC (High Aspect Ratio Contact hole), Oxide etch rate, Oxide-to-ACL selectivity, RIE lag, Top CD, Bowing CD, SLP (Single Langmuir Probe), EEPF (Electron Energy Probability Function), IED (Ion Energy Distribution), Ion flux, A-OES (Actinometric Optical Emission Spectroscopy), PDP (Plasma Display Panel), Luminance, Luminous efficacy, sustain voltage margin, formative delay, statistical delay, address discharge time lag, lifetime

학번 : 2009-30211



# 목 차

|  |        |
|--|--------|
| 국 문 초 록 .....                                    | i      |
| 목 차 .....  | v      |
| 그 립 목 차 .....                                    | viii   |
| 표 목 차 .....                                      | xv     |
| <br><b>제 1 장 서 론</b> .....                       | <br>1  |
| 1.1 연구 배경 및 목적 .....                             | 1      |
| 1.2 논문의 구성 .....                                 | 5      |
| <br><b>제 2 장 플라즈마를 활용한 건식 식각 장치</b> .....        | <br>8  |
| 2.1 건식 식각 장치의 종류 .....                           | 8      |
| 2.2 용량 결합 플라즈마 (CCP) 및 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치 ..... | 11     |
| 2.2.1 용량 결합 플라즈마 (CCP) 장치의 원리 .....              | 11     |
| 2.2.2 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치의 원리 .....              | 15     |
| 2.3 자화된 플라즈마 장치 .....                            | 20     |
| 2.3.1 기존의 자화된 플라즈마 장치들의 원리 .....                 | 20     |
| 2.3.2 자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 장치의 원리 .....         | 23     |
| <br><b>제 3 장 M-ICP 장치의 구성 및 기본 특성</b> .....      | <br>28 |
| 3.1 전자석의 설계 및 구성 .....                           | 30     |
| 3.1.1 Biot-Savart's law 의 정의 및 활용 방법 .....       | 30     |
| 3.1.2 FEMM 의 구현 원리 및 M-ICP 모델링 .....             | 35     |
| 3.1.3 제작된 전자석의 기본 사양 및 M-ICP 장치의 구성 .....        | 38     |
| 3.2 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포 .....                | 41     |
| 3.2.1 M-ICP case 1, 2 에서의 자기장의 공간 분포 .....       | 41     |
| 3.2.2 자기장의 최적화된 공간 분포 형성에 관한 이론적 고찰 .....        | 45     |
| 3.2.3 M-ICP case 3~7 에서의 자기장의 공간 분포 .....        | 49     |
| 3.3 ICP 및 M-ICP 장치의 방전 특성 비교 .....               | 56     |
| 3.3.1 Langmuir probe 를 활용한 플라즈마 진단 방법 .....      | 56     |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.2 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 특성 진단 .....                   | 60         |
| 3.3.3 자기장의 세기 변화에 따른 M-ICP Case 7 의 플라즈마 특성 진단 .....      | 71         |
| 3.4 요약 및 향후 과제 .....                                      | 93         |
| <b>제 4 장 High Aspect Ratio Contact hole 의 식각 특성 .....</b> | <b>95</b>  |
| 4.1 RIE lag 현상에 대한 이해 .....                               | 96         |
| 4.1.1 RIE lag 현상의 정의 .....                                | 96         |
| 4.1.2 RIE lag 현상의 발생 원인 .....                             | 99         |
| 4.1.3 산화물 식각 과정에서 생기는 RIE lag 현상에 대한 기존 연구 내용 .....       | 105        |
| 4.2 M-ICP 장치에서 process parameter 에 따른 HARC 식각 특성 .....    | 112        |
| 4.2.1 HARC 샘플의 사양 및 실험 방법 .....                           | 114        |
| 4.2.2 Bias frequency 의 영향 .....                           | 119        |
| 4.2.3 Magnetic flux density 의 영향 .....                    | 124        |
| 4.2.4 Neutral gas pressure 의 영향 .....                     | 131        |
| 4.2.5 Bias power 의 영향 .....                               | 137        |
| 4.2.6 Source power 의 영향 .....                             | 142        |
| 4.2.7 Gas ratio 의 영향 .....                                | 147        |
| 4.3 요약 및 향후 과제 .....                                      | 152        |
| <b>제 5 장 결 론 .....</b>                                    | <b>156</b> |
| <b>부 록 AC PDP 의 구동 및 수명 특성 .....</b>                      | <b>161</b> |
| A.1 SrO 의 적용을 통한 AC PDP 의 발광 효율 개선 .....                  | 163        |
| A.1.1 패널의 제작 및 실험 방법 .....                                | 163        |
| A.1.2 패널의 방전 전압 및 발광 효율 .....                             | 165        |
| A.2 SrO 를 적용한 AC PDP 의 구동 특성 연구 .....                     | 169        |
| A.2.1 Ramp reset 의 극성에 따른 패널의 reset 방전 특성 .....           | 169        |
| A.2.2 Negative ramp reset 을 적용한 패널의 address 방전 특성 .....   | 174        |
| A.3 SrO 를 적용한 AC PDP 의 수명 특성 연구 .....                     | 180        |
| A.4 요 약 .....   | 184        |

|                |     |
|----------------|-----|
| 참고 문헌 .....    | 186 |
| ABSTRACT ..... | 198 |

## 그림 목 차

그림 1.1 플라즈마의 분류

그림 2.1 공정 압력과 플라즈마 밀도에 따른 플라즈마 식각 장치의 분류

그림 2.2.1 RIE etcher 의 플라즈마 발생 개념도

그림 2.2.2 RF 가 Sine Wave 인 경우  $V_a$ 와  $V_b$

그림 2.2.3 구동 주파수에 따른 전자 밀도 및 전자 온도의 변화 (Ar plasma)

그림 2.2.4 평판형 유도 결합 플라즈마 장치의 개념도

그림 2.2.5 실린더형 유도 결합 플라즈마 장치의 개념도

그림 2.2.6 유도 결합 플라즈마의 전기적 등가 회로

그림 2.3.1 MERIE etcher 의 구조

그림 2.3.2 ECR plasma etcher (왼쪽) 및 Helicon plasma etcher (오른쪽)의 구조

그림 2.3.3 M-ICP 장치 내 wave 의 분산 관계

그림 3.1.1 전자석이 설치될 ICP 장치의 모식도

그림 3.1.2 Biot-Savart's law 예시: 전류  $I$  가 흐르는 원형 루프

그림 3.1.3 유한 요소법을 활용한 domain 의 근사화 및 해석

그림 3.1.4 유한 요소법을 활용한 subdomain 내부의 근사해 도출

그림 3.1.5 FEMM 을 활용한 M-ICP 장치의 모델링

그림 3.1.6 실험에 사용된 전자석 (왼쪽) 및 측면의 모식도 (오른쪽)

그림 3.1.7 전류 인가 및 플라즈마 방전에 따른 전자석의 시간별 온도 변화 (그림 3.1.8 의 4번 및 5번 전자석 기준)

그림 3.1.8 전자석이 설치된 M-ICP 장치의 모식도

그림 3.2.1 M-ICP case 1 (왼쪽) 과 case 2 (가운데) 에서의 공간적인 자기장 분포

그림 3.2.2 M-ICP case 1 (위) 과 case 2 (아래) 에서 반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

그림 3.2.3 Flute instability 의 발생 원리

그림 3.2.4 R-wave 가 전파하기 위한 수직축 방향의 자기장 분포

그림 3.2.5 M-ICP case 3 (왼쪽) 과 case 4 (가운데) 에서의 공간적인 자기장 분포

그림 3.2.6 M-ICP case 5 (왼쪽), case 6 (가운데), case 7 (오른쪽) 에서의 공간적인 자기장 분포

그림 3.2.7 M-ICP case 3 (위) 과 case 4 (아래) 에서 반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

그림 3.2.8 M-ICP case 5 (위) 와 case 6 (아래) 에서 반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

그림 3.2.9 M-ICP case 7 에서 반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

그림 3.3.1 Dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve

그림 3.3.2 Dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve 의 근사화

그림 3.3.3 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래): 5mT

그림 3.3.4 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래): 10mT

그림 3.3.5 Substrate 중심에서 압력별 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래)

그림 3.3.6 Magnetic mirror field 에서의 particle 의 움직임 (왼쪽) 및 plasma confinement (오른쪽)

그림 3.3.7 Substrate 로부터 수직한 방향으로의 자기장 분포

그림 3.3.8 플라즈마 밀도의 반경 방향 균일도

그림 3.3.9 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 substrate 중심에서의 magnetic flux density

그림 3.3.10 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 공간적인 자기장 분포 (Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 4, 8, 12Gauss)

그림 3.3.11 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 공간적인 자기장 분포 (Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 15, 19, 22, 25Gauss)

그림 3.3.12 M-ICP case 7 에서 반경 방향 및 수직축 방향의 자기장 분포 (Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 4, 8, 12Gauss)

그림 3.3.13 M-ICP case 7 에서 반경 방향 및 수직축 방향의 자기장 분포 (Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 15, 19, 22, 25Gauss)

그림 3.3.14 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

그림 3.3.15 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

그림 3.3.16 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 22 / 25Gauss)

그림 3.3.17 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

그림 3.3.18 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

그림 3.3.19 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 22 / 25Gauss)

그림 3.3.20 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

그림 3.3.21 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

그림 3.3.22 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 22 / 25Gauss)

그림 3.3.23 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

그림 3.3.24 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

그림 3.3.25 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 22 / 25Gauss)

그림 3.3.26 Time-varying  $B_z$  field (10mTorr)

그림 3.3.27 Substrate 중심에서 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1, 5, 10, 20mTorr)

그림 3.3.28 ICP 와 M-ICP 의 EEDF (Ar plasma, 2mTorr, 150W)

그림 3.3.29 플라즈마 밀도의 반경 방향 균일도 (1, 5, 10, 20mtorr)

그림 4.1.1 Etcher 에 투입한 wafer 개수에 따른 역 etching 률

그림 4.1.2 Microscopic loading effect 의 개념도

그림 4.1.3 RIE Lag 의 개념도

그림 4.1.4 Pattern etching 시 etch time 에 따른 solid angle 의 변화

그림 4.1.5 Pattern etching 시 발생하는 Surface Charging

그림 4.1.6 Knudsen Transport mechanism 에 근거한 neutral flux

그림 4.1.7 Shin-ichi Imai 실험에서 사용한 샘플 구조 (왼쪽) 와 제안된 bias power dependence mechanism

그림 4.1.8 A. C. Westerheim 실험에서 나타난 bias power 와 RIE lag 의 상관 관계

그림 4.1.9 H. H. Doh 실험에서 나타난 bias power (왼쪽) 및 pressure (오른쪽) 와 RIE lag 의 상관 관계

그림 4.1.10 K. Nojiri 실험에서 나타난 pressure 와 RIE lag 의 상관 관계

그림 4.1.11 T. Akimoto (왼쪽) 와 K. Siozawa (오른쪽) 실험에서 나타난 O<sub>2</sub> 첨가량과 RIE lag 의 상관 관계

그림 4.1.12 산소 첨가에 따른 mass spectral intensity 비율의 변화

그림 4.2.1 RIE lag 특성 평가를 위한 HARC 의 구조

그림 4.2.2 SiON 제거 전후의 HARC 측면 (Top CD : 160nm)

그림 4.2.3 Bias frequency 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

그림 4.2.4 Bias frequency 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.5 Bias frequency 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.6 Bias frequency 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

그림 4.2.7 HARC pattern 의 다양한 top CD (90, 110, 130, 160, 200nm) 에 따른 normalized etch depth (Bias frequency : 2MHz)

그림 4.2.8 Magnetic flux density 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

그림 4.2.9 Magnetic flux density 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.10 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.11 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

그림 4.2.12 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Normalized atomic density, (b) 플라즈마 밀도 및 전자 온도

그림 4.2.13 Magnetic flux desntiy 에 따른 EEPF 측정 결과

그림 4.2.14 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

그림 4.2.15 Neutral gas pressure 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

그림 4.2.16 Neutral gas pressure 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.17 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.18 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

그림 4.2.19 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Normalized atomic density, (b) 플라즈마 밀도 및 전자 온도

그림 4.2.20 Neutral gas pressure 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

그림 4.2.21 Bias power 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile



그림 4.2.22 Bias power 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.23 Bias power 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.24 Bias power 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

그림 4.2.25 Bias power 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

그림 4.2.26 Source power 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

그림 4.2.27 Source power 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.28 Source power 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.29 Source power 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

그림 4.2.30 Source power 에 따른 (a) Normalized atomic density, (b) 플라즈마 밀도 및 전자 온도

그림 4.2.31 Source power 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

그림 4.2.32 Gas ratio 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

그림 4.2.33 Gas ratio 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

그림 4.2.34 Gas ratio 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

그림 4.2.35 Gas ratio 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

그림 4.2.36 gas ratio 에 따른 Normalized atomic density

그림 A.1.1 AC PDP 의 기본 구조

그림 A.1.2 SrO 를 적용한 테스트 패널의 단면도

그림 A.1.3 Aging 시간에 따른 테스트 패널의 방전 전압 변화

그림 A.1.4 상, 하판 합착 및 소성 후의 패널에 대한 TOF-SIMS 분석 결과

그림 A.1.5 테스트 패널의 (a) 발광 휘도, (b) 방전 효율

그림 A.1.6 각 테스트 패널에 흐르는 방전 전류

그림 A.1.7 특정 전압에서 각 테스트 패널에 흐르는 방전 전류 비교

그림 A.2.1 AC PDP 에서 일반적으로 사용되는 구동 파형

그림 A.2.2 Positive ramp reset 단계에서 측정한 IR emission

그림 A.2.3 Negative ramp reset 단계에서 측정한 IR emission

그림 A.2.4 MgO 패널의 Y 전극 및 A 전극 간 벽전압 변화

그림 A.2.5 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 Y 전극 및 A 전극 간 벽전압 변화

그림 A.2.6 Negative ramp reset 에 기반한 새로운 구동 파형

그림 A.2.7 인가한 구동 파형에 따른 테스트 패널의 dynamic voltage margin

그림 A.2.8 MgO 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 background luminance

그림 A.2.9 인가한 구동 파형에 따른 테스트 패널의 address discharge time lag

그림 A.3.1 테스트 패널의 방전 시간에 따른 전압 변화

그림 A.3.2 테스트 패널의 방전 시간에 따른 (a) 발광 휘도, (b) 발광 효율

그림 A.3.3 테스트 패널의 방전 시간에 따른 단위 cell 당 파워 소모량

그림 A.3.4 외삽법으로 추정된 각 패널의 예상 수명

## 표 목 차

|   |     |
|---|-----|
| 표 3.1 Substrate 중심의 자기장 세기에 대한 각 전자석별 기여도 .....         | 33  |
| 표 3.2 M-ICP case 3~7 의 전자석 설정 조건 .....                  | 50  |
| 표 3.3 M-ICP case 1~7 의 자기장 공간 분포 결과 요약 .....            | 60  |
| 표 A.1 MgO 및 MgO-SrO-SiO <sub>2</sub> 패널의 전압 인가 조건 ..... | 175 |

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

플라즈마 (Plasma) 는 전기적으로 준중성 (Quasi-neutral) 상태인 전리된 기체를 말하며[1], 명칭은 1928년 진공관내의 기체 방전에 관한 연구를 수행하는 과정에서 I. Langmuir 에 의해 처음으로 붙여졌다[2]. 플라즈마는 일반적인 중성 기체와는 달리 멀리 떨어져있는 입자간에도 쿨롱힘 (Coulomb force) 으로 서로 영향을 주고 받는 집단적인 행동 (Collective behavior) 을 한다. 원래는 자연계에 존재하는 플라즈마를 분석하는데 그쳤던 연구는 산업 발달과 더불어 활기를 띠면서 다양한 분야에 응용을 하는 방향으로 발전되어 갔다. 그 결과, 광원 및 디스플레이 소자[3], 미래 에너지 소스인 핵융합로[4][5], 진보된 초고집적 전자 소자의 제작[6][7], 신물질의 합성[8], 고 부가가치의 박막 증착[9][10], 고온의 열원 및 환경 산업 분야[11]에 이르기까지 플라즈마를 활용한 기술은 여러 산업 분야에 걸쳐 필수 불가결한 요소로 자리 잡았다. 특히 대용량의 정보를 고속으로 처리해야 할 필요성이 점차 중요해지면서 반도체 메모리 소자나 logic 소자의 선풍은 점차 감소하는 이른바 nano device 의 시대가 도래하였는데 이를 가능케 한 것이 바로 플라즈마를 활용한 건식 식각 기술이라고 해도 과언이 아니다.

플라즈마는 그림 1.1 과 같이 온도와 밀도에 따라 다양하게 분류 및 응용될 수 있다[12]. 이 중에서 PDP 나 건식 식각 등에 이용되는 플라즈마는 글로우 방전 (Glow discharge) 에 의해 형성된다. Glow discharge 은 동작 압력이 낮고, 전자와 중성 입자 또는 전자와 이온간의 충돌 주파수가 각 종들간의 열적 평형을 이루기에 불충분하다. 따라서 형성된 플라즈마 내 전자의 온도는 상당히 높은 반면, 이온이나 중성 입자의 온도는 크게 높지 않는데 이러한 이유로 Glow

discharge 을 통해 형성된 플라즈마를 저온 플라즈마 (Cold plasma) 라고 부르기도 한다. 반도체 소자 공정 중의 하나인 반응성 이온 식각 공정은 Glow discharge 을 통해 형성된 플라즈마를 이용하는 대표적인 기술이다. 반응성 이온 식각 공정에서는 플라즈마 내 sheath 에서 가속되어 기판에 수직으로 입사하는 이온을 주로 활용하며 이로 인해 비등방성 (Anisotropic etching) 식각이 가능하다. 따라서 등방성 식각을 주도적으로 이용하는 습식 식각 공정 대비 미세 패터닝 가공 및 형성이 용이하다[13].

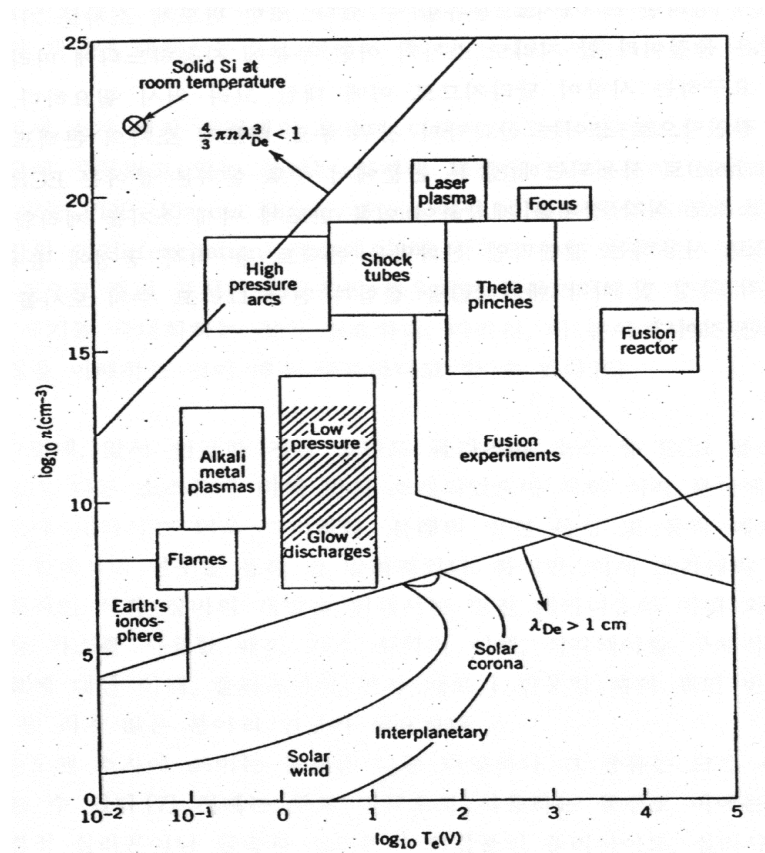


그림 1.1 플라즈마의 분류[12]

방대한 메모리 용량, 작은 chip size, 빠른 처리 속도와 낮은 생산단가는 거시적인 관점에서 보았을 때 차세대 반도체 소자가 갖추어야 할 기본적인면서도 필수적인 조건이다. 또한 생산성 향상을 위한 직경 450mm 의 대면적 wafer 공정, 물질의 etch rate 개선, 소자의 성능을 저하시키는 profile 의 왜곡 현상 최소화, 마스크 대비 식각 물질의 높은 selectivity 보장, 그리고 다양한 process parameter 에 따른 식각 메커니즘에 대한 정확한 이해 등은 미시적인 관점에서 보았을 때 플라즈마를 활용한 건식 식각 공정에서 고려해야 할 핵심적인 요소들이다.

이와 관련하여, 본 논문은 대면적 공정이 가능하고 물질의 etch rate 을 향상시킬 뿐만 아니라 RIE lag 제어가 용이한 식각 장치를 연구하는 것에 초점을 맞추었다. 이를 위해 통상적인 식각 장치로 활용되고 있는 용량 결합 플라즈마 식각 장치나 (CCP 혹은 Capacitively Coupled Plasma) 유도 결합 플라즈마 식각 장치 (ICP 혹은 Inductively Coupled Plasma) 대비 고밀도의 플라즈마를 형성하여 물질의 etch rate 를 향상시킬 수 있는 자화 유도 결합 플라즈마 식각 장치 (M-ICP 혹은 Magnetized Inductively Coupled Plasma) 를 구성하였다. 이 후 다양한 측정 장비를 활용한 플라즈마 진단을 통해 ICP 와 M-ICP 장치에서 형성된 플라즈마의 방전 특성을 비교 분석하였다. 그리고 산화물 기반의 high aspect ratio contact hole (HARC) 을 활용하여 식각 실험을 진행하였으며 이를 통해 ICP 와 새롭게 구성한 M-ICP 장치에서 oxide etch rate, Oxide-to-ACL selectivity 및 식각 전후의 profile 형상 등을 비교 분석해 보았다. 이에 더하여, M-ICP 장치에서 나타나는 산화물 기반 HARC 의 RIE lag 특성을 neutral gas pressure 및 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 등을 포함한 여러 가지 process parameter 와 연계하여 고찰해 보았다.

궁극적으로, 플라즈마 진단 결과와 식각 결과에 대한 종합적인 고찰을 통해

ICP 대비 플라스마 밀도의 균일도가 뛰어나며 RIE lag 제어가 용이한 M-ICP 장치를 차세대 플라스마 건식 식각 장치로 활용할 수 있는 가능성을 검토해 보았다.

## 1.2 논문의 구성

본 논문은 제 1 장의 서론과 제 5 장의 결론을 포함하여 모두 5 장으로 구성되어 있으며 이에 더하여 부록을 수록하였다. 제 2 장에서는 기존에 연구된, 그리고 본 논문에서 연구한 플라즈마 식각 장치들의 방전 원리 및 특징에 대하여 소개하였다. 현재 상용화된 CCP 장치 및 ICP 장치뿐만 아니라 MERIE 등의 자화된 플라즈마 장치들까지 두루 살펴보았으며 특히 본 논문에서 핵심적으로 연구한 M-ICP 장치를 자세히 설명하였다.

제 3 장에서는 M-ICP 장치의 구성 방법 및 설치 과정에 대하여 설명하였다. 먼저 현재 사용 중인 ICP 장치에 설치할 다수의 전자석의 위치를 결정하고 무료로 배포되는 소프트웨어인 FEMM (ver. 4.2) 을 활용하여 실제 process chamber 의 dimension 을 기반으로 한 모델링을 완료한 후, substrate 중심에 원하는 세기의 자기장을 인가하기 위해 필요한 전자석의 반경 및 코일의 turn 수 등을 설계하였다. 그리고 실제 전자석을 제작 및 설치한 후 Gaussmeter 로 측정한 process chamber 내부의 자기장의 공간 분포와 시뮬레이션을 통해 예측한 결과가 일치함을 확인하였다. 특히, substrate 중심에는 같은 세기의 자기장이 인가되더라도 자기장의 인가 방법에 따라 substrate 중심으로부터 반경 방향 혹은 수직 축 방향의 자기장의 공간 분포가 달라질 수 있음을 확인하였고 dual Langmuir probe 등을 활용하여 자기장의 공간 분포에 따른 플라즈마의 방전 특성을 비교 분석한 결과, 대면적 공정의 관점에서 건식 식각 환경에 보다 유리하게 작용할 수 있는 최적화된 자기장의 공간 분포가 존재할 수 있음을 확인하였다.

제 4 장에서는 ICP 장치 및 M-ICP 장치가 보여주는 산화물 기반 HARC 의 식각 특성에 대하여 설명하였다. M-ICP 장치에서 aspect ratio 가 매우 낮은 pattern 의 etch rate 나 selectivity 특성 등은 기존에 연구된 바가 있지만 산화물



기반의 HARC pattern 에서 그 특성이 보고된 바는 없다. 그리고 HARC pattern 에서 발생할 수 있는 ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) 혹은 RIE lag (Reactive Ion Etching lag) 라고 불리는 현상을 제어하는 것도 식각 장비에서 요구되는 매우 중요한 사항이기 때문에 M-ICP 장치에서 각종 process parameter 의 변화에 따라 나타나는 RIE lag 특성을 집중적으로 분석해 보았다. 또한 ion energy analyzer (IEA), dual Langmuir probe (DLP), single Langmuir probe (SLP), Actinometric (A-OES) 등의 측정법을 활용하여 HARC 식각 과정에서 각종 process parameter 가 etch rate, Oxide-to-ACL selectivity, RIE lag 등에 미치는 영향을 파악하고 이에 기반하여 M-ICP 장치에서의 HARC 식각 메커니즘을 연구해 보았다.

제 5 장에서는 건식 식각과 관련하여 본 논문에서 다룬 내용들을 총정리하는 동시에, M-ICP 장치를 중심으로 3 장과 4 장에서 살펴본 연구 결과들이 학술적인 측면과 산업적인 측면에서 어떠한 의미를 가질 수 있는지 되짚어 보도록 하겠다.

한편 부록에서는 저온 플라즈마의 또다른 대표적 응용 기술 중의 하나인 PDP 의 고속 구동 특성 및 패널의 수명 특성에 대한 연구를 소개하였다. PDP 의 낮은 발광 효율 및 높은 소비 전력 문제는 2차 전자 방출 계수가 높은 신 보호막의 적용을 통해 해결한 연구 결과가 많지만 패널의 구동 특성에 대해서는 연구가 제대로 이루어 지지 않고 있다. 그러나 영화 ‘아바타’ 를 계기로 널리 보급된 3D PDP 의 자연스러운 화상 표현을 위해서는 response time 을 개선하는 것도 굉장히 중요하다. 따라서 본 장에서는 2차 전자 방출 계수가 높은 신 보호막에 의한 priming 효과를 극대화할 수 있는 새로운 파형을 디자인하여 response time 을 획기적으로 개선한 연구 결과를 소개하고자 한다. 또한 3000 시간 이상의 방전을 통하여 기존 MgO 를 적용한 패널과 신 보호막을 적용한

패널의 수명 특성을 비교 분석해 보기도 하였다. 다만 본 논문의 핵심은 M-ICP 장치의 특성 연구에 있는 만큼 PDP 관련 연구 내용은 부록을 통해 최대한 간략하게 소개하고 마무리하도록 하겠다.

## 제 2 장 플라즈마를 활용한 건식 식각 장치

### 2.1. 건식 식각 장치의 종류

플라즈마를 활용한 건식 식각 공정은 mask 바로 아래 부분의 막질을 제외한 나머지 막질을 제거하여 wafer 상에 미세한 pattern 을 구현하는 것으로 반도체 공정에서 가장 중요한 process 중 하나이다. 이러한 플라즈마의 건식 식각에 사용되는 장치는 플라즈마를 생성시키는 방법에 따라 용량 결합 플라즈마 (Capacitively Coupled Plasma) 혹은 RIE (Reactive Ion Etch) reactor, MERIE (Magnetic Enhanced RIE), ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma, Helicon plasma, 유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma) 등으로 분류될 수 있다. 그림 2.1 은 과거 반도체 칩 제작에 사용되었거나 현재 사용되고 있는 다양한 플라즈마 식각 장치를 공정 압력과 플라즈마 밀도에 따라 분류한 것이다[14].

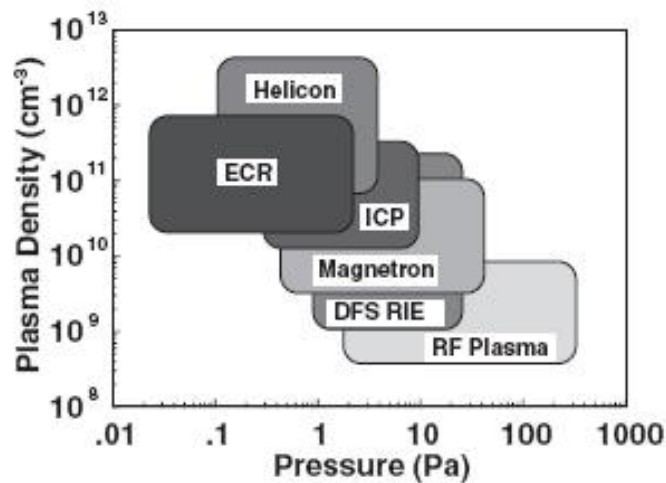


그림2.1 공정 압력과 플라즈마 밀도에 따른 플라즈마 식각 장치의 분류[14]

초기의 플라즈마 식각 장치인 RF plasma etcher 는 wafer 가 놓이는 전극은 ground 를 유지하고 상부 전극에 RF 를 인가하는 방식인데 self-bias 가 약하기 때문에 wafer 로 도달하는 이온의 가속이 떨어져 etch rate 가 매우 낮다. 게다가 이 장치에서는 radical 에 의한 화학적 식각이 지배적으로 일어나기 때문에 이 방성 식각 특성이 요구되는 미세 pattern 형성에는 적합하지 않아 현재는 거의 사용되지 않고 있다[15]. 이후 상부 전극은 ground 를 유지하고 wafer 가 놓이는 전극에 RF 를 인가하는 RIE type[16] 의 etcher 가 많이 사용되었는데, 이 장치는 물리적 식각이 지배적으로 이루어지기 때문에 RF plasma etcher 에 비해 etch rate 가 높을 뿐만 아니라 미세 pattern 의 가공에도 상대적으로 유리하다. 이로부터 한 단계 더 업그레이드된 MERIE type[17] 의 etcher 는 RIE type etcher 의 chamber 주위에 자기장을 인가하여 고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 RF plasma etcher 및 RIE type etcher 를 포함하는 CCP 장치들은 건식 식각 공정 초기부터 사용되어 왔으며, 최근까지도 산화물 식각 공정에 많이 이용되고 있다. 이는 RF 전극 면적 대비 ground 전극 면적이 넓고, 전극 간격이 좁은 CCP 장치의 고유한 특성이 산화물 식각 공정에서 요구되는 조건과 잘 부합하기 때문이다[15]. 특히 DF CCP (Dual Frequency CCP)[14] type 의 etcher 가 산화물 식각에 주로 사용되고 있는데, 이는 이 장치가 두 개의 주파수를 병행하여 사용함으로써 높은 에너지의 ion 에 의한 이방성 식각을 유도하는 동시에 ion 과 radical 의 비율을 적절히 조절하여 높은 selectivity 를 얻을 수 있기 때문이다. (기존의 MERIE etcher 역시 polymer 증착을 유도하여 selectivity 를 향상시킬 수 있는데, 100 nm급 이하의 초미세 pattern 을 가지는 device 에서는 식각 중에 형성된 polymer 가 오히려 식각에 방해가 될 수 있기 때문에 적합하지 않다.) LAM 社 의 FLEX, TEL 社 의 SCCM이 대표적이며, LAM 社 의 FELX45의 경우 3개의 RF (Radio Frequency) 주파수를 가지는 power

를 동시에 인가할 수 있다. 한편 높은 주파수를 사용하는 Very High Frequency CCP (VHF CCP) 장치에 대한 연구도 최근 활발히 진행 되고 있는데 이에 대해서는 2.2.1 절에서 자세히 언급하도록 하겠다.

ICP etcher[18][19] 는 process chamber 상부에 원형 또는 나선형의 antenna 를 설치한 후 RF power 를 인가하여 플라즈마를 발생시키는 장치다. 상술하면, antenna coil 에 전류를 흘려 형성되는 자기장에 의해 process chamber 내에는 전기장이 유도되는데 이 전기장에 의해 전자를 가속시켜 플라즈마를 형성한다. ICP etcher 는 장치의 구조가 비교적 간단하며 수 mT 정도의 매우 낮은 압력에서도 플라즈마를 안정적으로 발생 및 유지시킬 수 있어 미세 pattern 의 가공에 유리한 측면이 있다. 또한 wafer 가 놓이는 substrate 에 bias power 를 별도로 인가하기 때문에 ion control 은 bias power 에 의해서, 그리고 radical control 은 source power 에 의해서 독립적으로 이루어질 수 있다는 특징점을 가지고 있다. ICP etcher 는 실제 반도체 공정에서는 poly 나 Al metal 식각에 주로 사용되고 있다. ICP 가 poly etcher 로써 지속적으로 사용되고 있는 이유는 gate poly 와 같은 미세 pattern 공정의 경우 저압 공정이 가능한 ICP 가 CCP 보다 유리하고 특히 poly 식각은 ion bombardment 에 의한 물리적 식각 보다는 radical 에 의한 화학적 식각의 지배를 받기 때문이다. 따라서 강한 self DC bias 에 의한 물리적 식각이 주도적으로 이루어지는 CCP etcher보다는 ion energy 를 독립적으로 control 할 수 있는 ICP etcher 가 여러 가지 측면에서 poly 식각 공정에 더 적합하다고 할 수 있다.

한편, MERIE etcher 이외에도 process chamber 주위에 자기장을 인가하여 플라즈마 밀도를 높인 장치들이 많이 연구가 되었는데 ECR plasma etcher 및 Helicon plasma etcher 등이 대표적이다. 자화된 플라즈마 장치들의 원리에 대해서는 2.3 절에서 자세히 다루도록 하겠다.

## 2.2 용량 결합 플라즈마 (CCP) 및 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치

### 2.2.1 용량 결합 플라즈마 (CCP) 장치의 원리

먼저 용량 결합 플라즈마, 즉 RIE type etcher 의 플라즈마 방전 원리를 알아보 고자 한다[18]. RIE type etcher 에서는 직류 자기 유도 전압에 의한 물리적 식각 이 지배적으로 이루어지기 때문에 이에 대한 이해가 선행될 필요가 있다. 그림 2.2.1 은 RIE etcher 의 플라즈마 발생 개념도이며, 그림에서 볼 수 있듯이 wafer 가 놓이는 전극에 교류 (AC) 전원이 인가된다. 전극이 절연물질이거나 식각하 는 물질이 절연체일 때 전극에 전하가 축적되어 전류가 흐르지 못할 수 있기 때문에 직류 (DC) 전원은 사용되지 않으며 반응성 효율을 높이기 위해 통상 13.56MHz 정도 되는 고주파의 AC 전원을 사용한다. 또한 RIE etcher 는 그림과 같이 플라즈마가 blocking capacitor 라고 불리는 축전기와 직렬로 연결되어 있는 데 이로 인해 전력을 가하는 전극에 바이어스 전압이 유도된다. 이를 보통 직 류 자기 유도 전압 (DC self-bias voltage) 이라고 부르며 이로 인해 RIE type etcher 에서 반응성 이온에 의한 물리적 식각이 일어날 수 있다. 이와 같이 축 전기가 플라즈마 회로와 직렬로 연결되어 있는 경우, 플라즈마 내에는 교류 전 류만 흐르고 직류 전류는 흐르지 못한다. 따라서 플라즈마 회로 내 전극에 AC 전원을 인가했을 때 얻어지는 각 전극면에서의 이온 전류와 전자 전류의 양은 같다.

일정한 전기장이 형성되어 있을때, 전하에 가해지는 힘  $F$  는 아래와 같다.

$$F = m\vec{a} = e\vec{E} \rightarrow \vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m} \rightarrow \vec{v} = \frac{e\vec{E}}{m}\tau, (\tau \text{는 가속 시간}) \quad (2.2.1)$$

이 때, 전하의 가속도는 질량에 반비례하고, 어떤 면으로 입사하는 전하의 flux  $J$  는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$J = ne\vec{v} = ne\left(\frac{e\vec{E}}{m}\right) = \frac{ne^2\tau}{m}\vec{E} \quad (2.2.2)$$

식에 따르면  $J$  역시 질량에 반비례하는데, 전자의 질량이 이온보다 매우 작기 때문에 반대로 전자의 전류 밀도 ( $J_e$ ) 는 이온의 전류밀도 ( $J_i$ ) 보다 매우 크다. ( $J_e \gg J_i$ )

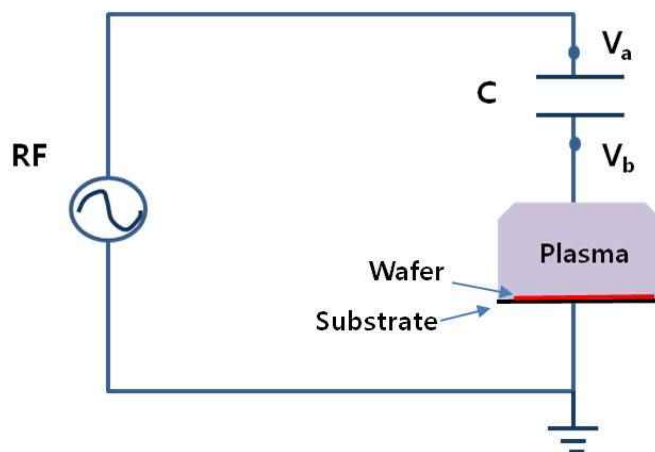


그림 2.2.1 RIE Etcher 의 플라즈마 발생 개념도[18][20]

한편, capacitor 가 연결된 전극에  $+V_a$  를 가하면 전자가 수집되고,  $-V_a$  를 가하면 이온이 수집된다. 이 때, 일정한 전기장 하에서  $J_e \gg J_i$  이므로 한 주기당 전자가 수집되는 양이 이온보다 많으며 이로 인해 capacitor 가 연결된 전극은 음으로 충전(charge) 된다. 하지만 전극이 음으로 충전됨에 따라, 주기를 거듭할

수록 이온이 수집되는 양이 전자보다 많아지게 되며 결국 한 주기당  $J_e = J_i$  가 되는 전압이 인가 되었을 때 steady state 에 도달한다. 이 때의 전압이 바로 직류 바이어스 전압 혹은 직류 자기 유도 전압이다. 만약 그림 2.2.2 와 같이 가해주는 RF 가 sine wave 인 경우, 플라즈마와 접한 전극, 즉  $V_b$ 가 한 주기당 양으로 남아있는 시간이 음으로 대전되어 있는 시간보다 상대적으로 매우 짧다. 따라서, 전극은 대부분의 시간 동안 negative potential 을 유지하며 이로 인해 ion bombardment 가 발생한다.

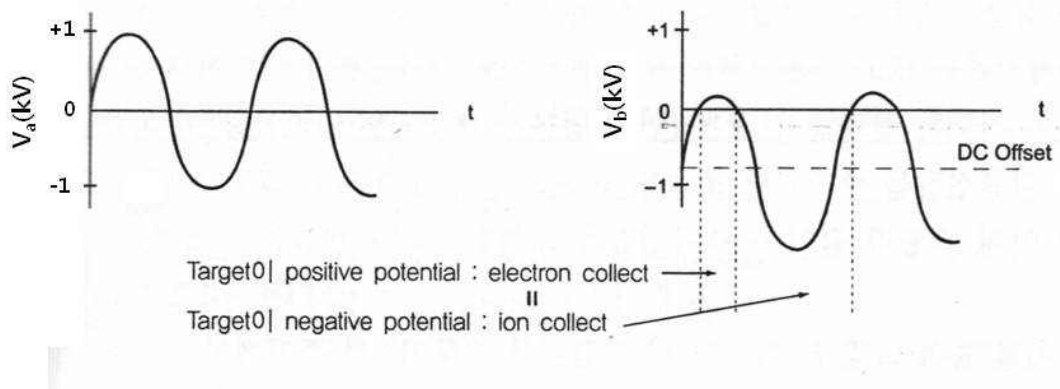


그림 2.2.2 RF 가 Sine Wave 인 경우  $V_a$ 와  $V_b$  [18][20]

위와 같은 원리로 동작하는 기존의 CCP 장치의 경우 2.1 절에서 설명한 바와 같이 물리적 식각이 지배적인 산화물 식각 공정 등에 활용되고 있지만 플라즈마 밀도가 낮아 수 십 nm 의 CD 를 가지는 초미세 pattern 을 식각하는데 쓰이기는 어렵다. 이에 최근에는 수 십 ~ 수 백 MHz 에 달하는 높은 주파수를 사용하여 초미세 pattern 을 식각하는 Very High Frequency CCP (VHF CCP) [21]-[23] 장치에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이는 주파수가 증가할 경우 이온 보다는 전자에 의한 전력 소모량이 증가하여 ion bombardment 에 의한 damage



는 감소하면서도 그림 2.2.3 과 같이 플라즈마 밀도가 증가하고 전자 온도는 감소하여 장치의 특성이 초미세 pattern 공정에 요구되는 조건과 비교적 잘 부합하기 때문이다[24].

그러나 주파수가 증가함에 따라 wavelength 가 길어져서 전극 간 거리와 비슷해질 경우 substrate 주위에 standing wave 로 인해 inhomogeneous 한 electric field 가 형성되기 때문에[22] VHF CCP 장치를 대면적 공정에 적용하기 위해서는 풀어야 할 숙제가 많이 남아 있다.

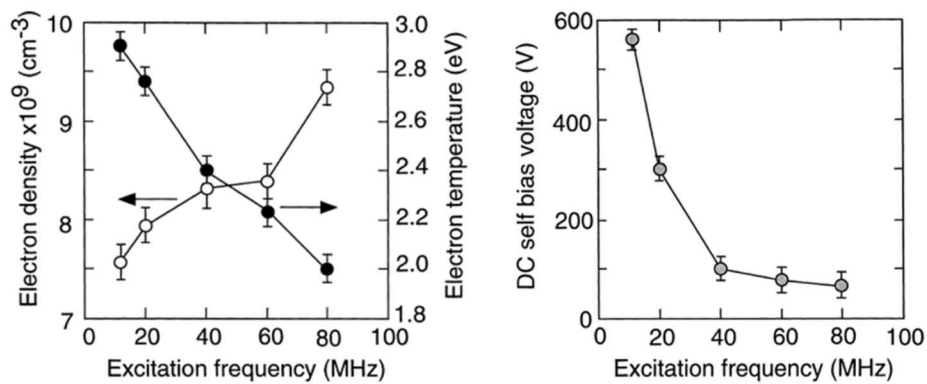


그림2.2.3 구동 주파수에 따른 전자 밀도 및 전자 온도의 변화 (Ar plasma)[24]

### 2.2.2 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치의 원리

유도 결합 플라즈마 장치는 크게 평판형 type 과 실린더 type 으로 구분될 수 있으며[25], 이에 대한 개략도는 그림 2.2.4 과 그림 2.2.5 에 각각 나타내었다 [18]. 그림 2.2.4 과 같은 평판형 type 의 유도 결합 플라즈마 장치의 경우, wire (통상 구리 선을 이용한다.) 가 안쪽 가운데로부터 바깥쪽 방향으로 1~4 회 정도 감겨져 있으며 플라즈마 발생을 위한 source power 장치가 진공 상태인 process chamber 의 외부에 형성되어 있다. 한편, 와선형의 안테나로부터 발생된 전자기파가 process chamber 내부로 침투할 수 있도록 anodizing 처리가 된 알루미늄이나 quartz 와 같은 절연 물질 (Dielectric) 이 process chamber 상부에 위치한다. 이렇게 함으로써 process chamber 내부에 gas 를 흘리고 안테나에 고주파의 전원을 인가 했을 때, 전자기파가 chamber 상부의 절연체를 투과하여 process chamber 내부로 들어와 플라즈마가 형성될 수 있다. Wafer 가 놓이는 전극에는 별도의 고주파 전력이 추가로 인가되는데, 이는 유도 결합 플라즈마 장치에서 발생된 플라즈마 내 이온의 에너지가 매우 약하기 때문에 이방성 식각 프로파일을 얻기 위해 필요한 sheath 전압을 형성해 주기 위함이다. 즉, 고주파의 전원을 wafer 가 놓인 전극에도 인가하여 dc self-bias voltage 를 형성하고 이온을 wafer 위에 형성된 pattern 쪽으로 끌어 당길 수 있도록 해주는 것이다.

한편, 그림 2.2.5 에 나와 있는 실린더 type 의 유도 결합 플라즈마 장치는 process chamber 주위에 coil 을 감는 형태로써, process chamber 내부로의 전자기파 침투를 위해 절연체를 process chamber wall 의 물질로 사용한다. 구조 상의 차이점만 있을 뿐, 기본적인 동작 원리는 실린더 type 이나 평판형 type 이 크게 다르지 않다[25].

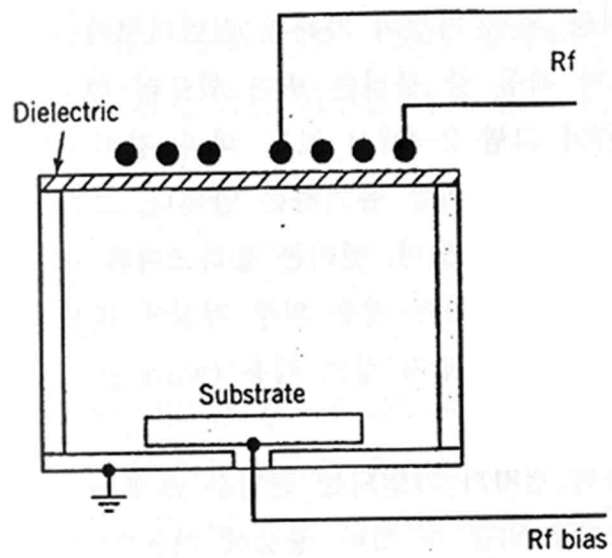


그림2.2.4 평판형 유도 결합 플라즈마 장치의 개념도[18]

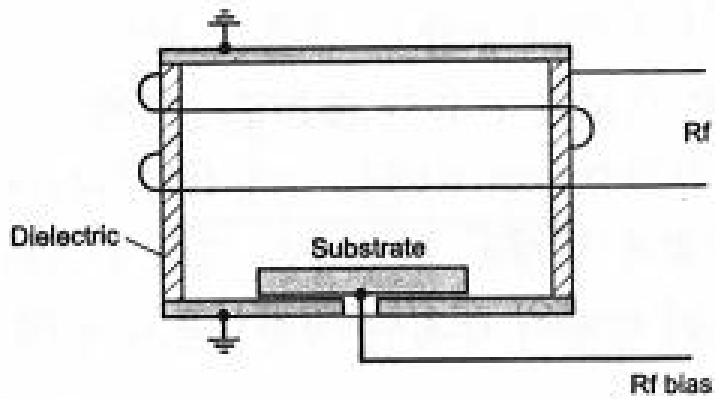


그림2.2.5 실린더형 유도 결합 플라즈마 장치의 개념도[18]

통상적인 유도 결합 플라즈마의 방전 원리는 다음과 같다[25][26]. 유도 결합 플라즈마 장치는 전력 전달의 수단으로 전류, 전압이 시간에 따라 변하는 RF (Radio Frequency) 전원 장치를 사용하는데 외부의 coil 을 통해 시변하는 전류를 인가하는 경우 흐르는 전류의 주위에는 아래와 같은 Ampere의 법칙에 의해 시변하는 자계가 형성된다.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.2.3)$$

또한 시변 자계가 있을 경우 아래와 같은 Faraday의 유도 법칙 (Faraday's Induction Law) 에 의해 시변 전계가 유도된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2.4)$$

이와 같이 생성된 비발산 회전 전계 (Divergence Free Electric Field)는,

$$\vec{J}_p = \sigma_p \vec{E} : \vec{J}_p; \text{플라즈마 전류}, \sigma_p; \text{플라즈마 전도도} \quad (2.2.5)$$

와 같이 표현될 수 있으며 플라즈마 전류를 구동하고 전자에 전력을 전달하는 핵심적인 역할을 한다. 이 때, 플라즈마 내부의 전류 경로는 1회 감겨진 변압기의 2차 축으로 비유될 수 있다. 만약 플라즈마 내부의 표피 전류에 의해 유기되는 시변 자기 flux 가 외부 coil 에 의해 생성되는 자기 flux 를 완전히 상쇄시킬 경우에는 결합계수 k 가 1이 되어 전원 쪽의 전력이 그대로 플라즈마로 전달되지만 이는 이상적인 경우에 불과하다. 일반적으로는 공간적으로 분포하

는 전류 경로와 플라즈마의 전기 전도도 등으로 인해 결합 계수가 상당한 제약을 받는다. 결국 결합 효율은 전자의 밀도, 충돌 주파수, 방전 압력 등의 변수들에 의해 결정된다. 2.3.2 절에서 설명하겠지만, 만약 유도 결합 플라즈마 장치에 자기장을 인가하면 여러 변수들에 의해 제한되는 전력 전달 효율을 높일 수 있다. 그림 2.2.6 는 유도 결합 플라즈마 장치의 전기적 등가 회로를 나타내고 있다[25].

앞서 말한 것과 같이 유도 결합 플라즈마 장치의 coil 과 플라즈마 사이의 전력 전달 관계는 변압기 결합 모델로 쉽게 설명된다. RF coil 에 의해 발생된 인덕턴스 ( $L_1$ ) 는 변압기의 primary wiring, 발생되는 플라즈마에 의한 인덕턴스 ( $L_2$ ) 는 secondary wiring 과 같다. 그리고  $L_2$  에 의해 유도된 전류와 플라즈마 내 저항  $R$  에 의해 에너지가 소비되며, 이 때 소모되는 전력은 중성 원자의 이온화, 여기화, gas dissociation 등으로 사용된다. 또한 plasma sheath 와 vacuum window (dielectric) 의 capacitance 를 각각  $C_1$  과  $C_2$ 로 나타낼 수 있는데 이에 의한 정전 결합도 발생할 수 있다. 따라서 유도 결합에 의한 플라즈마 뿐만 아니라 정전 결합에 의한 플라즈마도 동시에 발생한다[18].

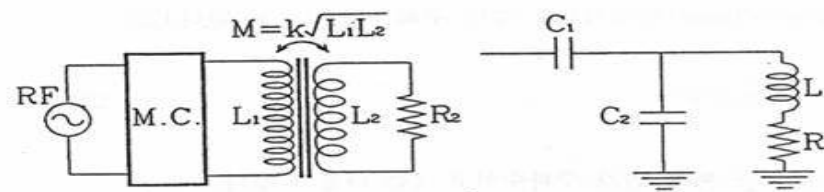


그림2.2.6 유도 결합 플라즈마의 전기적 등가 회로[25]

(M; 상호 인덕턴스, k; 결합계수,  $L_1$ ; 유도 결합용 코일에 의한 인덕턴스,  $L_2$ ; 플라즈마에 의한 인덕턴스,  $R_2$ ; 플라즈마 내 생성된 저항, R; sheath 및 플라즈마에 의한 저항 값,  $C_1$ ,  $C_2$ ; 플라즈마 sheath 및 vacuum window에 의한 capacitance)

위와 같은 원리로 동작하는 ICP 장치의 경우 2.1 절에서 설명한 바와 같이 화학적 식각이 지배적인 poly 나 metal 의 식각 장치로서 활용되고 있다. 즉 CCP 나 ICP 장치의 경우 각각의 장점을 살려 물리적 혹은 화학적 식각 장치로 활용되고 있지만 그 용도와 목적이 제한적이다. 또한 대면적 공정의 관점에서 보았을 때, ICP 장치의 경우 안테나로부터 발생하는 전기장이 플라즈마 상태에 영향을 주기 때문에 안테나의 모양이나 위치를 적절히 설계하여 플라즈마 밀도의 균일도를 제어할 수는 있지만 어느 정도 한계가 따른다.

## 2.3 자화된 플라즈마 장치

### 2.3.1 기존의 자화된 플라즈마 장치들의 원리

고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있는 식각 장치를 연구하는 가장 중요한 이유는 물질의 etch rate 를 개선하여 생산성을 향상시키기 위함이다. 2.2.1 절에서 최근 CCP 장치의 플라즈마 밀도를 높이기 위해 수 십 ~ 수 백 MHz 에 달하는 높은 주파수를 사용한다고 설명한 바 있는데 process chamber 주위에 자기장을 형성하는 것도 플라즈마의 밀도를 높일 수 있는 좋은 방법 중의 하나이다. 실제로 자기장을 인가한 다양한 형태의 식각 장비들이 연구된 바 있고 2.1 절에서 그 중 대표적이라고 할 수 있는 MERIE, ECR plasma etcher, Helicon plasma etcher 에 대해 간단히 언급한 바 있는데 2.3.1 절에서는 이들의 동작 원리에 대해 살펴보도록 하겠다.

MERIE etcher 는 그림 2.3.1 과 같이 기존의 RIE type etcher 에 자기장을 형성하여 고밀도의 플라즈마를 형성함은 물론 물질의 etch rate 를 더욱 증가시킬 수 있는 장치다[17][27]. 또한 RIE type etcher 대비 상대적으로 저압에서 plasma 의 안정적인 유지가 가능하기 때문에 보다 정밀하게 미세 pattern 을 가공할 수 있다. TEL 社 의 DRM 이 대표적이며, 수백 nm 급 device 의 SAC (Self Aligned Contact), MC (Metallic Contact) etching 등의 주요 식각 공정에서 사용되었다. 이는 MERIE etcher 가 etch rate 뿐만 아니라 polymer 증착을 통한 mask 대비 selectivity 향상에도 유리한 장치이기 때문이다. 다만 자기장이 substrate 에 평행한 방향으로 작용하는 한편 electric field 와 수직인 방향으로 작용하기 때문에 플라즈마 내 전자는  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift 를 하는데, 이로 인해 전자가 chamber wall 로 손실되는 것을 방지할 수 있지만 플라즈마 밀도의 균일도가 떨어져[27] MERIE

etcher 를 대면적 공정에 적용하는데 어려움이 있다.

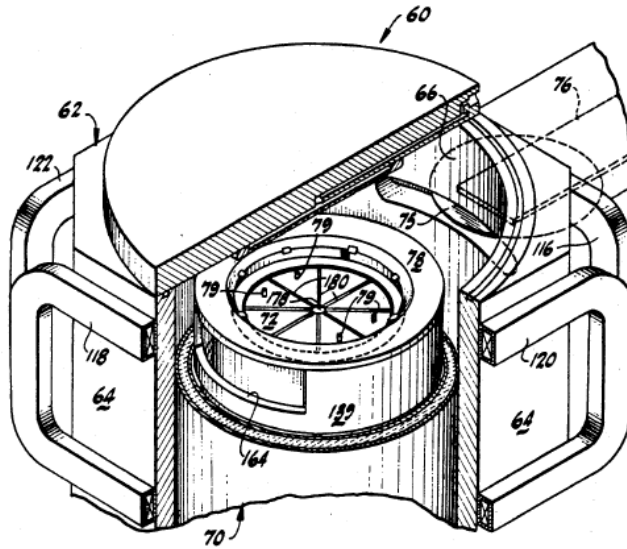


그림 2.3.1 MERIE etcher 의 구조[27]

ECR plasma etcher 는 그림 2.3.2 의 왼쪽과 같이 microwave 에 자기장을 인가하여 낮은 압력에서도 chamber 표면으로부터 떨어진 곳에 고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있다[18]. 특히 microwave 의 주파수와 전자의 cyclotron 주파수가 일치할 때 ECR 현상이 발생하면서 전력을 효율적으로 흡수할 수 있다. 예를 들어 microwave 의 주파수가 2.45 GHz 일 경우 ECR 조건을 만족하는 자기장의 세기는 약 875 Gauss 정도이다. 다만 이렇게 엄청난 세기의 자기장을 대면적에 걸쳐 균일하게 얻기는 매우 어렵다. 이는 대면적의 플라즈마를 형성하기 위해 필요한 확산 거리가 길어 장치의 부피가 매우 커져야 하기 때문이다.

Helicon plasma etcher 는 플라즈마 내부에 생성된 helicon wave 의 고유한 특성을 이용하는 장치다[18][29]. Helicon wave 는 Whistler wave 가 자화된 일정 크기



의 용기 내에 구속되어 전파하는 것으로, 이 전자기파의 선단(tip)이 나선형으로 움직이는 것으로부터 그 이름이 붙여졌다. 이러한 helicon plasma 는 수 ~ 수 십 MHz 의 입력 주파수 영역에서  $10^{12}/\text{cm}^3$  이상의 고밀도 플라즈마를 형성하지만 확산 챔버가 필요하여 대면적화가 어려운 단점이 있다.

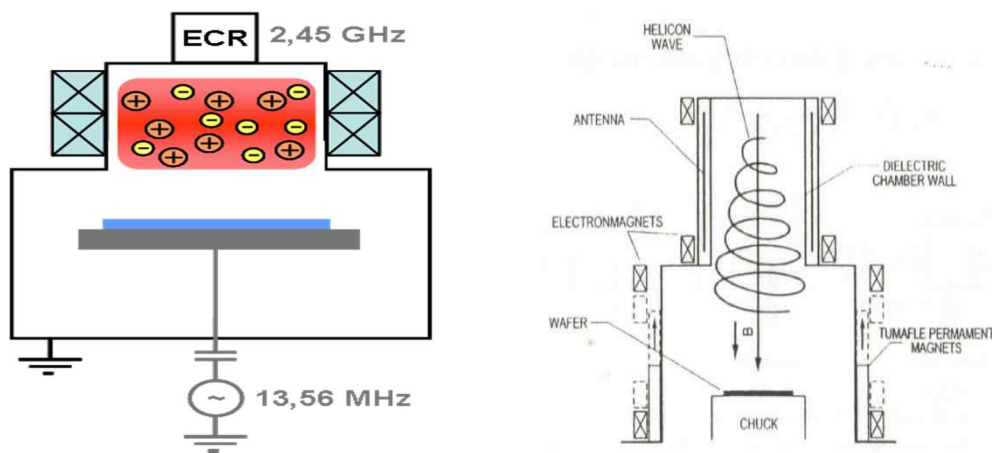


그림2.3.2 ECR plasma etcher[28] (왼쪽) 및 Helicon plasma etcher[18] (오른쪽)의 구조

상기의 내용을 요약해 보면 자화된 플라즈마 장치들을 활용할 경우 쉽게 고밀도의 플라즈마를 형성하여 제품의 생산성을 높일 수 있지만 magnetic field 와 plasma 의 interaction (MERIE etcher), 플라즈마 발생 면적에 비례한 확산 거리나 확산 챔버가 요구되는 문제 (ECR plasma etcher, Helicon plasma etcher) 등으로 인해 장치들을 대면적 공정에 적용하기 어렵다.

### 2.3.2 자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 장치의 원리

2.2.2 절에서 자세히 설명한 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치 외부에 약한 자기장을 인가하면 플라즈마가 발생함과 동시에 다양한 종류의 wave 가 전파하는데 이 중에서도 R-wave (Right-handed circularly polarized wave) 와 L-wave (Left-handed circularly polarized wave) 가 대표적이다[18]. 3장에서 자세히 소개하겠지만, 본 논문에서 다룬 M-ICP 장치는 그림 2.2.4 과 같은 평판형 ICP 장치의 안테나로부터 발생하는 전계와 수직한 방향으로 자기장이 인가되어 결과적으로 wave 가 자기장에 대해 평행하게 전파하는 구조이다. 이러한 구조를 가진 M-ICP 장치를 통해 기존의 CCP 혹은 ICP 장치에서 찾아볼 수 없었던 다양한 효과를 기대할 수 있다. 먼저 인가된 자기장에 의한 플라즈마 confinement 에 의해 CCP 혹은 ICP 장치 대비 고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있다는 것이 M-ICP 의 가장 대표적인 장점이다[26]. 플라즈마의 밀도가 높아지면 식각하고자 하는 물질의 etch rate 를 높일 수 있음을 물론 CCP 혹은 ICP 장치 대비 저압에서의 공정이 가능해질 수 있기 때문에 RIE lag 개선에도 매우 효과적일 것이라고 예상할 수 있다[30]-[32]. 또한 M-ICP 장치는 시스템의 전력 전달 효율이 높고 Q 값이 상대적으로 낮아 impedance matching 이 안정적으로 이루어질 수 있다[20].

따라서 M-ICP 장치 내부로 전파하는 wave 의 특성을 정확히 이해하는 것은 매우 중요하다. 이와 관련하여, 먼저 건식 식각 공정에 사용되는 저온 플라즈마 내부의 전자의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[26][33].

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - m\nu_{en} \vec{v} \quad (2.3.1)$$

한편, 플라즈마 매질의 유전율은 아래와 같이 텐서 (dielectric tensor) 로 표현된

다[34].

$$\vec{\sigma} = \frac{ne^2}{m_e} \begin{pmatrix} \frac{\nu_{en} + i\omega}{(\nu_{en} + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} & -\frac{\omega_{ce}^2}{(\nu_{en} + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} & 0 \\ \frac{\omega_{ce}^2}{(\nu_{en} + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} & \frac{\nu_{en} + i\omega}{(\nu_{en} + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\nu_{en} + i\omega} \end{pmatrix} \quad (2.3.2)$$

또한 장치 내부로 전파하는 파동 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla^2 E - \nabla(\nabla \cdot E) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \cdot E = 0 \quad (2.3.3)$$

위와 같이 주어진 dielectric tensor 와 파동 방정식으로부터 플라즈마 내부로 전파하는 파동의 분산 관계식을 얻을 수 있는데 자기장에 평행하게 전파하는 횡파의 경우 다음과 같이 주어진다.

$$k = \frac{\omega}{c} \left\{ 1 \pm \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} \mp \omega)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.4)$$

두 개의 부호는 각각 R-wave 와 L-wave 를 나타내는데, 만약  $\omega$  가 전자의 cyclotron frequency 보다 매우 작은 경우 ( $\omega \ll \omega_{ce}$ ) 아래와 같이 근사화될 수 있으며 이를 Whistler wave 의 분산 관계식이라고 부른다.

$$\omega = \left( \frac{ck}{\omega_{pe}} \right)^2 \omega_{ce} \quad (2.3.5)$$

한편 본 논문의 실험 영역에서의 특성 주파수의 크기는,

$$\omega_1 = \frac{\omega_{ce}}{2} \left\{ \left( 1 + 4 \cdot \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (2.3.6)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_{ce}}{2} \left\{ \left( 1 + 4 \cdot \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right\} \quad (2.3.7)$$

와 같이 주어지며 따라서  $\omega_{di} \ll \omega \leq \omega_{ce} \ll \omega_{pe}$  에 해당하는 영역에서는 그림 2.3.3 과 같이 낮은 주파수를 가지는 R-wave 가 존재함을 예상할 수 있다 [26][35]. 이러한 경우 ohmic heating 뿐만 아니라 wave heating 에 의해서도 플라스마 내 전자에 에너지가 전달될 수 있기 때문에 앞서 말한 것처럼 M-ICP 장치의 전력 전달 효율은 높아지고 플라스마의 밀도가 증가할 수 있는 것이다.

한편, 장치 내부의 플라스마 밀도가 일정하지 않고 gradient 가 존재할 경우 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 확산이 일어나는데 외부 자기장이 존재하지 않을 경우 확산 계수  $D$  는 다음과 같이 표현된다[12].

$$D = \frac{kT}{m \nu} \quad (2.3.8)$$

위 식과 같이 확산 계수  $D$  는 열 에너지  $kT$  와 질량  $m$  및 충돌 주파수  $\nu$  에 의해 결정된다. 이 때 충돌 주파수는 압력에 비례하기 때문에 결과적으로 압력이 높아야 하전 입자의 확산 손실을 줄일 수 있다.

하지만 외부 자기장이 존재할 경우 앞선 경우와 반대로 압력이 낮아야 자장과 수직인 방향으로의 확산 손실이 줄어들는데 이는 다음과 같은 식에서 기인한다 [12][33].

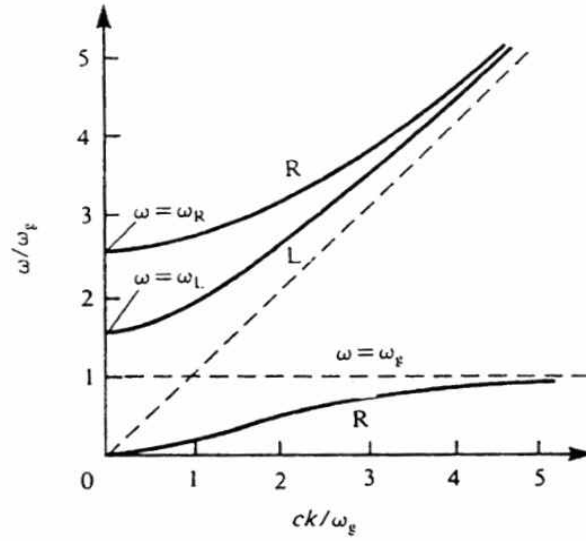


그림2.3.3 M-ICP 장치 내 wave 의 분산 관계 ( $\omega_g$  : cyclotron frequency)[26]

$$D_{\perp} = \frac{D}{1 + \omega_c^2 \tau^2} \quad (2.3.9)$$

$$D_{\perp} = \frac{kT v_m}{m \omega_c^2} (\omega_c^2 \tau^2 \gg 1) \quad (2.3.10)$$

따라서 외부 자기장의 세기가 클수록, 압력이 낮아질수록 확산 계수가 작아지므로 자기장에 대해 수직한 방향으로의 하전 입자의 확산 손실이 줄어들어 M-ICP 장치에서 고밀도의 플라즈마가 생성될 수 있는 것이다. 외부 자기장이 존재할 경우 확산 계수는 충돌 주파수  $\nu$  에 비례하는데 이는 인가된 자기장을 중심으로 회전하고 있는 입자들의 guiding center 가 자기장과 수직한 방향으로 움직이기 위해서는 충돌이 필요하기 때문이다. 결국 바로 앞에서 말한 바와 같이, 압력은 낮고 자기장의 세기는 커야 자장에 의한 플라즈마의 confinement 효과가 극대화될 수 있다.

M-ICP 장치 이외에도 자기장을 활용하여 플라스마 밀도를 높이는 식각 장치의 종류는 2.3.1 절에서 설명한 바와 같이 매우 다양하다. 또한 자기장을 인가하지 않더라도 2.2.1 절에서 설명한 바와 같이 CCP 장치에 높은 주파수를 인가하여 플라스마 밀도를 높이는 방법도 존재한다. 그러나 앞서 설명한 장치들은 대면적 공정의 관점에서 보았을 때 기술적인 한계점을 보여주었다. 반면 본 논문에서 연구한 M-ICP 장치는 자기장의 공간 분포 형성을 최적화 함으로써 대면적의 플라스마를 균일하게 형성할 수 있는 아주 중요한 장점을 가지고 있는데 이에 대해서는 3 장에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

### 제 3 장 M-ICP 장치의 구성 및 기본 특성

제 3 장에서는 본 연구에서 식각 및 진단의 목적으로 사용된 M-ICP 장치의 구성 과정 및 구성이 완료된 장치의 플라즈마 밀도 균일도를 포함한 기본적인 플라즈마 방전 특성에 대하여 설명하고자 한다.

원하는 자기장의 세기 (Magnetic flux density) 를 wafer 가 놓이는 substrate 에 인가하기 위해서는 전자석의 적절한 설치 위치를 결정해야 하며 이 외에도 bobbin 의 반경, copper coil 이 bobbin 에 감겨지는 횟수 등에 대한 설계가 필요하다. 따라서 현재 보유 중인 ICP 장치에서 전자석의 설치가 가능한 위치를 우선적으로 파악하고, 해당되는 모든 위치에 전자석을 설치하였을 때 0~30Gauss 정도의 magnetic flux density 가 substrate 에 인가될 수 있도록 하는 전자석 각각의 bobbin 의 반경 및 copper coil 의 감김 횟수 등을 Biot-Savart's law[36]를 토대로 예측해 보았다. 그리고 예측된 값들을 무료 배포용 소프트웨어인 FEMM (Finite Element Method Magnetics) 에 대입하여 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 및 자기장의 공간적인 분포를 보다 상세하게 관찰해 보았다. 마지막으로 Gaussmeter 를 활용하여 substrate 중심에 대하여 반경 방향 혹은 수직축 방향 (혹은 substrate 중심으로부터의 수직 높이가 증가하는 방향) 으로 실제 인가되는 magnetic flux density 를 측정해 보았고, 그 결과가 시뮬레이션 결과와 비교적 정확하게 일치함을 확인할 수 있었다.

한편, 구성된 M-ICP 장치가 ICP 장치 대비 가지는 방전 특성을 비교 분석해 보기 위해 DLP (Dual Langmuir Probe) 를 활용하여 플라즈마 밀도 및 전자 온도 등을 측정해 보았다. 그리고 알려진 바와 같이 M-ICP 에서 ICP 대비 보다 고밀도의 플라즈마가 형성됨을 확인할 수 있었다[26]. 또한 같은 세기의 magnetic flux density 가 substrate 중심에 인가되더라도 전자석의 운영 방법에 따라 반경

방향 혹은 수직축 방향에 대한 자기장의 공간적인 분포가 다양해질 수 있는데, 이로 인해 플라즈마의 방전 특성도 달라질 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 플라즈마의 밀도를 극대화하고 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도를 ICP 대비 개선할 수 있는 최적화된 자기장의 공간 분포가 존재할 수 있음을 확인하였다. M-ICP 장치의 구성 방법과 방전 특성에 대한 보다 자세한 내용들은 이어지는 절에서 차례대로 설명하도록 하겠다.



### 3.1 전자석의 설계 및 구성

#### 3.1.1 Biot-Savart's law 의 정의 및 활용 방법

그림 3.1.1 에는 현재 실험실에서 보유 중인 ICP 장치의 (전자석이 설치되기 이전이므로 ICP 장치라고 칭하였다.) 모식도가 나타나 있다. 여기서 전자석의 설치가 가능한 위치는 matching box 하단부, RF window 하단부, substrate 근처, Turbo Molecular Pump 근처 등으로 모두 4곳이며 그림 상에는 해당 위치가 체크되어 있다.

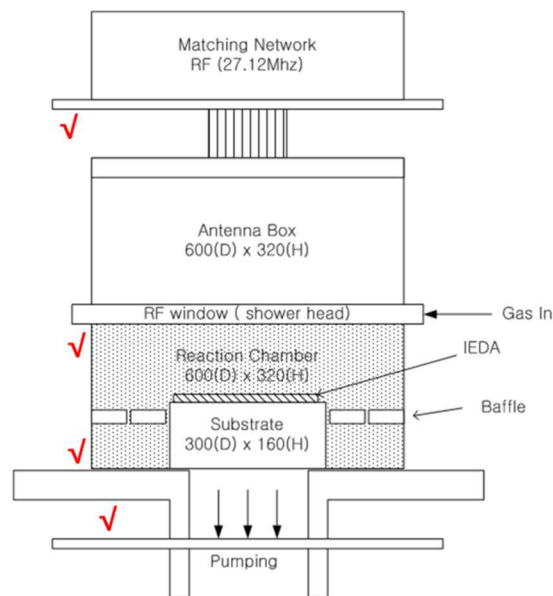


그림 3.1.1 전자석이 설치될 ICP 장치의 모식도

M-ICP 장치는 ECR plasma etcher 와 마찬가지로 자기장을 인가하여 발생하는 cyclotron resonance 를 electron 의 에너지원으로 사용할 수 있는데 그림 3.1.1 과

같이 27.12MHz 의 주파수를 가지는 source generator 를 사용할 경우 magnetic flux density 가 약 9.6Guass 일 때 그 효과를 기대할 수 있다. 따라서 본 M-ICP 장치는 2.45Ghz 의 주파수를 가지는 generator 기반의 ECR plasma etcher 의 경우와 같이 엄청난 세기의 자기장을 필요로 하지 않기 때문에 4곳에 위치한 전자석이 substrate 중심에 최소 0Gauss (ICP) 에서 최대 30Gauss 정도의 magnetic flux density 만 인가할 수 있도록 설계해도 충분하다.

한편, 폐경로  $C'$  에 흐르는 전류  $I$  에 의해 결정되는 자기장  $B$  의 세기는 Biot-Savart's law 에 의해 아래와 같이 표현된다[36].

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_{C'} \frac{d\mathbf{l}' \times \mathbf{a}_R}{R^2} \quad (T) \quad (3.1.1)$$

따라서 위의 식을 적용했을 때, 그림 3.1.2 와 같이 전류  $I$  가 흐르는 원형 루프의 중심으로부터  $z$  만큼 떨어진 높이에서의 자기장의 세기는 다음과 같이 나타난다[36].

$$\mathbf{B} = \mathbf{a}_z \frac{\mu_0 I b^2}{2(z^2 + b^2)^{3/2}} \quad (T) \quad (3.1.2)$$

만약 원형 루프에 감겨진 coil 의 횟수가  $n$  이라면 높이  $z$  에서의 자기장  $B$  는,

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_z \frac{\mu_0 I b^2}{2(z_i^2 + b^2)^{3/2}} \quad (T) \quad (3.1.3)$$

와 같다.

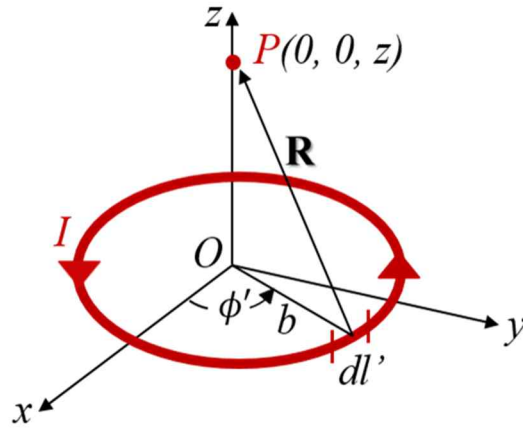


그림 3.1.2 Biot-Savart's law 예시: 전류  $I$  가 흐르는 원형 루프[36]

그러므로 위의 식에 기반하여 전자석 bobbin 의 반경  $b$  와 coil 의 감김 횟수  $n$  및 전자석의 개수 등이 주어졌을 때, 임의의 높이  $z$  에서의 자기장의 세기를 예측할 수 있다. 3.2 절에서 자세히 설명하겠지만 본 연구에서는 전자석의 개수 및 위치, 전류의 인가 방향에 따른 자기장의 공간적인 분포를 파악하고 대면적 공정의 관점에서 M-ICP 장치의 효과를 극대화할 수 있는 최적화된 자기장의 분포를 찾아내고자 되도록 많은 개수의 전자석을 다양한 위치에 배치하고자 하였다. 이에 그림 3.1.1 의 체크 표시된 위치에 모두 7개의 전자석을 설치하였고 정확히는 matching box 하단부에 3개, RF window 하단부에 1개, substrate 근처에 1개, 그리고 Turbo Molecular Pump 근처에 2개를 배치하였다. 그리고 1A 미만의 전류를 7개의 전자석에 시계 방향 (시스템 위에서 보았을 때의 인가 방향) 으로 인가했을 때 substrate 중심에 0~30Gauss 범위의 magnetic flux density 가 인가 되도록 하는 전류의 세기와 전자석 내 coil 의 감김 횟수 등을 예측한 결과가 표 3.1 에 나타나 있다.

| 위치        | 반경 (m)    | 높이 (m) | 감김 횟수 (회) | 전류 (A) | 자기장 (Gauss) |
|-----------|-----------|--------|-----------|--------|-------------|
| Upper 1   | 0.1-0.12  | 0.575  | 1400      | 0.7    | 0.4         |
| Upper 2   | 0.2-0.22  | 0.575  | 1400      | 0.7    | 1.2         |
| Upper 3   | 0.3-0.32  | 0.575  | 1400      | 0.7    | 2.1         |
| Lateral 1 | 0.31-0.33 | 0.165  | 1000      | 0.7    | 9.6         |
| Lateral 2 | 0.31-0.33 | 0.15   | 1000      | 0.7    | 10.2        |
| Lower 1   | 0.22-0.24 | 0.21   | 1400      | 0.7    | 10.8        |
| Lower 2   | 0.3-0.32  | 0.21   | 1400      | 0.7    | 11.3        |

표 3.1 Substrate 중심의 자기장 세기에 대한 각 전자석별 기여도

표 3.1 에서 Upper 1, 2, 3 은 matching box 하단부에 위치한 반경이 다른 3개의 전자석을, Lateral 1 은 RF window 하단부에 위치한 전자석을, Lateral 2 는 substrate 근처에 위치한 전자석을 나타내며 Lower 1, 2 는 Turbo Molecular Pump 근처에 위치한 반경이 다른 2개의 전자석을 의미한다. 또한 M-ICP 장치를 구성하는 요소들의 dimension 을 고려하여 전자석의 내외곽 반경을 표와 같이 설정하였고 감김 횟수의 경우 process chamber 의 측면에 위치한 window 때문에 공간적인 제약을 받는 Lateral 1, 2는 1000 으로, 나머지 전자석은 1400 으로 가정하였다. 그리고 모든 전자석에 시계 방향으로 0.7A 의 전류를 인가하였을 때 각 전자석이 substrate 중심에 가하는 magnetic flux density 를 Biot-Savart's law 에 근거하여 계산해 보았더니 표 3.1 과 같은 결과가 나왔다. 결과적으로 그림 3.1.1 에 총 7개의 전자석을 배치하여 각각의 전자석에 동일한 방향으로 1A 미만의 전류를 인가하였을 때 substrate 중심에서의 magnetic flux density 가 최대 약 45.6Gauss 정도임을 예상해볼 수 있었다. 따라서 전자석은 표 3.1 에 나타난 bobbin 의 반경과 coil 의 감김 횟수대로 제작하였다.

한편, 식각에 최적화된 플라즈마를 발생시키기 위해서는 substrate 중심에서의 magnetic flux density 뿐만 아니라 자기장의 2차원적인 공간 분포도 매우 중요한데 이를 FEMM 이라는 소프트웨어를 활용하여 파악해 보았다. FEMM 소프트웨어에 대한 설명과 자세한 실험 결과는 다음 절에서 설명하도록 하겠다.

### 3.1.2 FEMM 의 구현 원리 및 M-ICP 모델링

FEMM 은 유한 요소법 (FEM : Finite Element Method) 에 근거하여 정상 자기장 (stationary magnetic field) 의 2차원 공간 분포를 시뮬레이션 할 수 있는 무료 배포용 소프트웨어다. 따라서 먼저 유한 요소법[37, 38] 이 무엇인지 살펴볼 필요가 있다. 유한 요소법은 BVP (Boundary Value Problems) 에서 근사해를 구하는 수치해석 방법 중의 하나로, 최소한의 오차를 가지는 해의 도출을 위하여 변분법 (variational methods) 을 활용한다. 이는 마치 미세 길이를 가지는 직선을 무수히 연결하여 하나의 커다란 원으로 근사화하는 것과 같은데, 실제로 유한 요소법을 토대로 한 FEMM 프로그램의 핵심은 그림 3.1.3 의 왼쪽과 같이 큰 domain 상의 아주 복잡한 방정식들을 다수의 작은 subdomain 상의 간단한 요소 방정식들로 근사화하는 것이다. 이렇게 근사화된 식들을 풀어내면, 그림 3.1.3 의 오른쪽과 같이 magnetic field 혹은 potential 의 공간적인 분포를 아주 상세하게 파악할 수 있다.

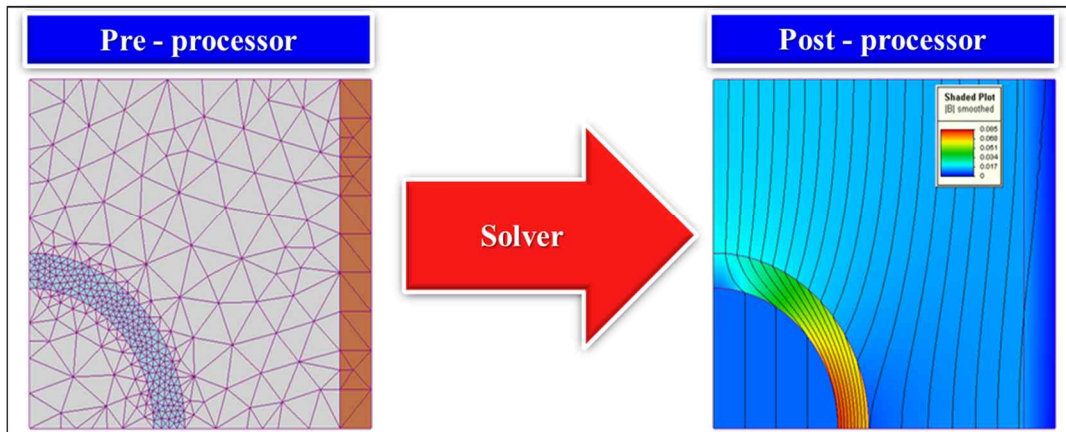


그림 3.1.3 유한 요소법을 활용한 domain 의 근사화 및 해석[37, 38]

한편, 그림 3.1.3 의 왼쪽 그림을 자세히 보면 인접한 세 개의 점을 연결한 삼각형이 하나의 작은 subdomain 을 이루고 이 subdomain 들이 모여 하나의 큰 domain 을 형성하고 있음을 알 수 있는데 이러한 작은 subdomain 내부의 공간 분포에 대한 solution 을 도출해 내는 예시가 그림 3.1.4 에 나타나 있다. 그림 3.1.4 의 왼쪽과 같이 인접한 세 개의 지점에 대한 전위나 자기장의 정보를 알고 있을 때, 그 지점들이 이루는 subdomain 내부의 전위나 자기장의 분포는 linear 하다고 가정할 수 있기 때문에 그림 3.1.4 의 오른쪽과 같은 과정을 거쳐 근사해를 도출해 낼 수 있다.

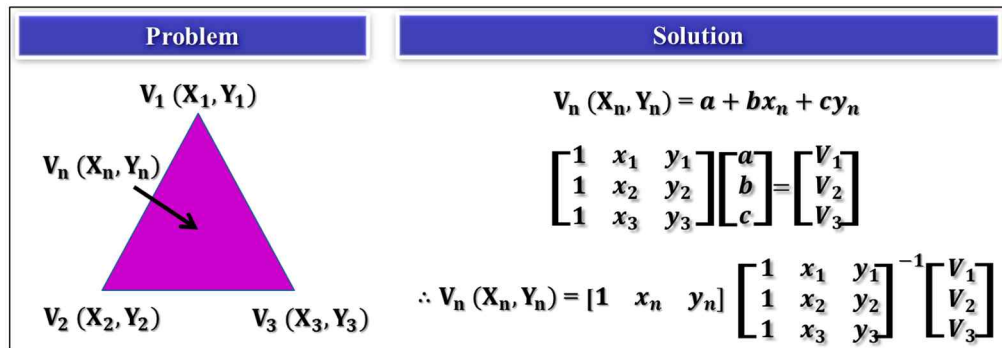


그림 3.1.4 유한 요소법을 활용한 subdomain 내부의 근사해 도출 [37, 38]

그림 3.1.1 에서 제시한 ICP 장치의 실제 dimension 에 근거하여 FEMM 프로그램 상에 process chamber 를 도시하고, 체크로 표시된 모든 위치에 전자석을 설치하여 전체 모델링을 완료한 것이 그림 3.1.5 에 나타나 있다. 프로그램 상에서 axis symmetric 한 solution 을 구할 수 있기 때문에 중심 축을 기준으로 한 쪽 부분만 모델링을 하였다. 한편 위, 아래, 오른 쪽에 모두 3개의 boundary 가 존재하는데 이들은 보통 0 으로 설정한다. 그리고 process chamber 내부 및 외부

의 매질은 air 로 설정하였다. 전자석은 상대적인 위치에 따라서 Upper, Lateral, Lower 라고 구분하였으며 전자석 bobbin 에 감길 copper coil 은 소프트웨어의 library 에서 기본으로 제공되는 18AWG (직경 약 1.02 mm) 를 사용하였다. Copper coil 의 감김 횟수는 3.1.1 절에서 설명한 바와 같이 3개의 upper coil 및 2개의 lower coil 은 1400번, 2개의 lateral coil 은 1000번으로 설정하였다. 그리고 이와 같은 모델링에 근거하여 확인한 자기장의 공간적인 분포 등에 대한 구체적인 결과들은 3.2 절에서 설명하도록 하겠다.

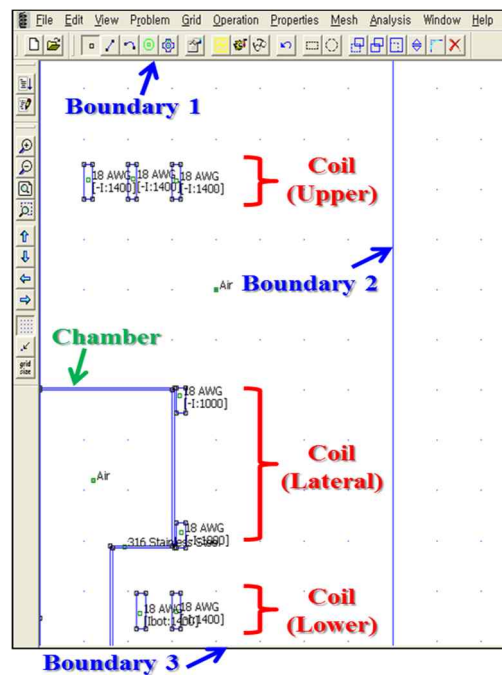


그림 3.1.5 FEMM 을 활용한 M-ICP 장치의 모델링



### 3.1.3 제작된 전자석의 기본 사양 및 M-ICP 장치의 구성

그림 3.1.6 에는 실험에 사용된 전자석이 나타나 있다. 먼저 전류가 인가될 coil 은 에나멜 코팅 처리가 된 copper 재질을 사용하였고 coil 이 감겨진 가장 바깥쪽 부분에는 내열성이 뛰어난 silicon 테이프를 부착하였다. Bobbin 은 누설 되는 자속이 없도록 비자성의 stainless steel 재질을 사용하였으며, copper coil 을 덮는 부분은 여러 가지 재료를 생각할 수 있지만 가공이 쉽고 내마모성 및 강도가 뛰어나다고 알려진[39] MC 나일론으로 제작하였다. 한편 IR thermometer 로 측정한 전자석 온도는 인가된 전류에 인한 전자석의 자체 발열과 플라즈마 방전으로 인한 process chamber 로부터의 복사열 때문에 그림 3.1.7 과 같이 시간에 따라 증가하지만 실험에 사용된 copper coil 의 내열 온도가 120°C 정도이기 때문에 cooling system 은 구성하지 않았다. (다만 양산에 적용하고자 할 경우, process chamber 및 전자석을 20 시간 이상 연속으로 운영할 수 있어 별도의 cooling system 설계가 필요하다.) 전자석을 운영하기 위한 직류 전원 공급 장치 일체는 RF noise 를 최소화하기 위해 conductive enclosure 에 구비하였으며 전자석으로부터 전원 장치에 연결되는 모든 도선들은 ground shielding 하였다.

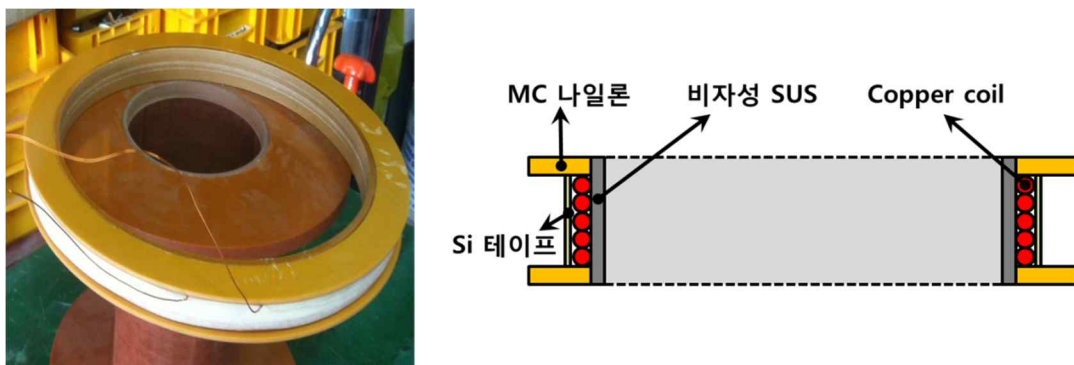


그림 3.1.6 실험에 사용된 전자석 (왼쪽) 및 측면의 모식도 (오른쪽)

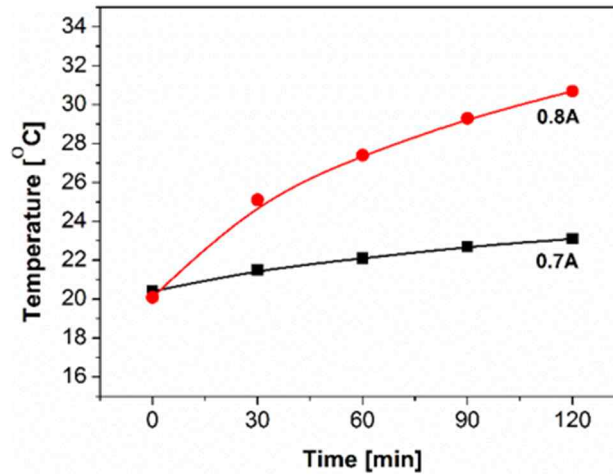


그림 3.1.7 전류 인가 및 플라즈마 방전에 따른 전자석의 시간별 온도 변화  
(그림 3.1.8 의 4번 및 5번 전자석 기준)

그림 3.1.8 에는 M-ICP 장치의 모식도가 나타나 있다. 전자석은 모두 7개가 위치하고 있으며 (Upper coil 3개, lateral coil 2개, lower coil 2개) 그림 상에서 7번 coil 의 경우만 전류가 반대 방향으로 인가되고 있는데 그 이유는 3.2 절에서 자세히 설명하도록 하겠다. Process chamber 의 상부에는 gas inlet 과 전자기파의 침투를 위한 RF window 가 위치하고 있으며 그 바로 위에 전자기파 발생을 위한 antenna box 가 자리잡고 있다. 본 M-ICP 장치는 평판형 type 으로 2개의 원형 antenna 를 사용하고 있으며 반지름은 각각 8.5cm 와 18.5cm 이다. 또한 antenna 를 copper pipe 의 형태로 제작하여 플라즈마 방전으로 인한 과열을 막는 냉각수를 흘릴 수 있도록 하였다. 플라즈마를 발생시키는 source power 의 RF 주파수는 27.12MHz 이며 시스템의 최상부에 impedance matching network 가 설치되어 있다. 일반적으로 유도성 부하 (inductive load) 의 impedance matching 은 2개의 capacitor 만 있으면 가능하지만 본 장치에서는 안쪽과 바깥쪽 antenna 의 impedance matching 을 위해 별도의 capacitor 를 하나 더 사용하고 있다. 이

capacitor 를 통해 반경 방향의 플라즈마 밀도 분포를 조절할 수 있으며 그 분포가 가장 균일한 경우의 값을 선택하여 고정하였다[33]. Ion energy 를 컨트롤하기 위한 bias power 의 경우 그림 상에 보이는 substrate 에 인가되는데, 2MHz 혹은 13.56MHz 의 RF 주파수를 병행하여 사용할 수 있다. 그리고 substrate 의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 에틸렌 글리콜 (Ethylene Glycol) 을 냉매로 사용하는 chiller 를 M-ICP 장치 외부에 배치하여 process chamber 내부로 냉매를 흘릴 수 있도록 하였다.

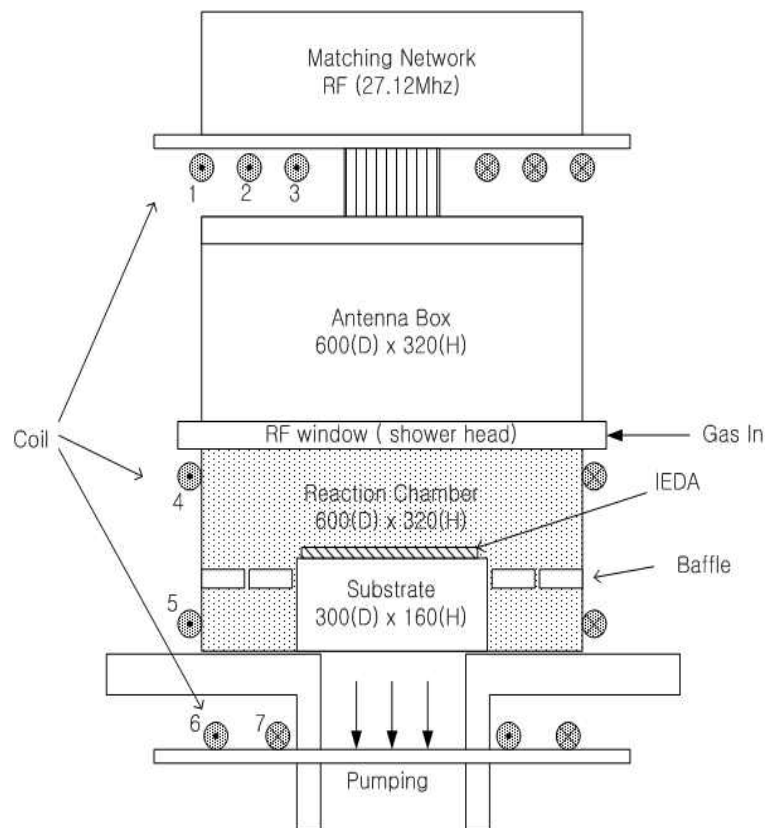


그림 3.1.8 전자석이 설치된 M-ICP 장치의 모식도

## 3.2 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포

### 3.2.1 M-ICP case 1, 2 에서의 자기장의 공간 분포

3.1 절에서는 Biot-Savart's law 및 FEMM 시뮬레이션 등을 통해 M-ICP 장치를 모델링하고 실제로 구성하는 과정을 설명하였다. 3.2 절에서는 구성된 M-ICP 장치에 설치된 전자석에 전류를 인가하였을 때 자기장이 공간상에 어떻게 분포하는지 알아보고자 한다. 먼저 단순히 모든 전자석에 시계 방향 (시스템 위에서 보았을 때의 인가 방향) 으로 동일한 세기의 전류를 인가하였을 때 나타나는 자기장의 공간적인 분포를 살펴 보기 위해 그림 3.1.8 에서 4번과 5번 2개의 전자석만을 사용하는 일반적인 경우와 (M-ICP case 1) 1, 2, 4, 5, 6, 7번 6개의 전자석을 모두 사용하는 경우 (M-ICP case 2) 로 나누어 FEMM 으로 시뮬레이션을 진행하였다. (3번 전자석의 경우 기관 중심에 인가되는 자기장의 세기가 미약하여 본 논문의 실험 과정에서는 사용되지 않았음을 밝힌다.) 이 때, 두 가지 조건에서의 자기장의 공간 분포를 비교적 동일한 환경에서 살펴 보기 위하여 case 1 의 4, 5번 전자석에는 250mA 의 전류를, 그리고 case 2 의 1, 2, 4, 5, 6, 7번 전자석에는 140mA 의 전류를 흘려 case 1 과 case 2 에서 substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density 가 7Gauss 정도로 동일하도록 설정하였다. 상기의 조건에 따른 자기장의 공간적인 분포를 FEMM 시뮬레이션을 통해 확인한 결과가 그림 3.2.1 에 나타나 있다. M-ICP case 1 의 경우, 4번과 5번 전자석으로부터 process chamber 안 쪽으로 flux line 이 형성되고 있지만 그 세기가 약해 결과적으로 substrate 중심으로부터 반경 방향으로 magnetic flux density 가 거의 일정하게 분포하고 있음을 알 수 있고 수직축 방향의 분포를 생각해 보았을 때 substrate 가 4번과 5번 전자석의 중간 지점으로부터 약간 아래 쪽에 위치하여 substrate

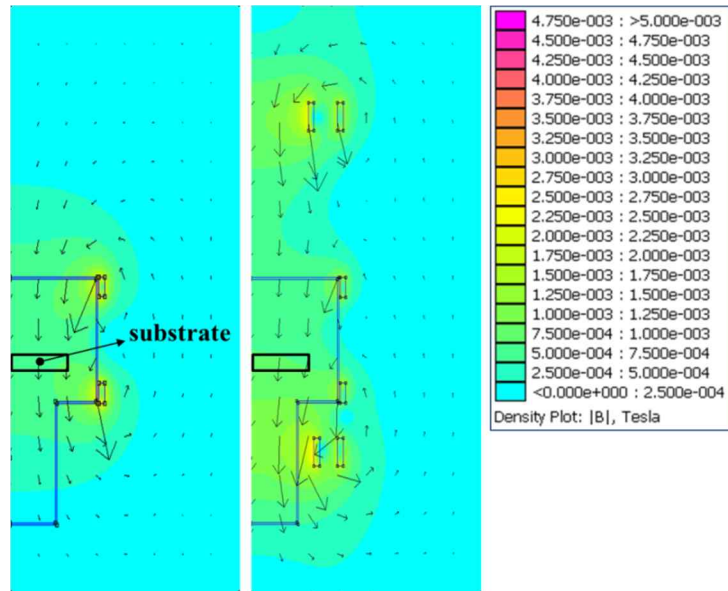


그림 3.2.1 M-ICP case 1 (왼쪽) 과 case 2 (가운데) 에서의 공간적인 자기장 분포

바로 윗부분 에서는 4번과 5번의 전자석에서 나오는 flux line 의 영향을 동시에 받는 반면 substrate 중심으로부터 수직 높이가 증가할수록 5번 전자석의 영향만 받아 결과적으로 magnetic flux density 가 매우 소폭 감소하고 있음을 알 수 있다. M-ICP case 2 의 경우 그림에서 보는 것처럼 그림 3.1.8 의 5번 전자석 보다는 substrate 와 반경 방향으로 가까운 거리에 위치한 7번 전자석에 의해 substrate 부근까지 강한 flux line 이 형성되고 있는데, 이로 인해 substrate 중심에서의 magnetic flux density 가 가장 강하며 이로부터 반경 방향으로 멀어질수록 그 세기가 약해지고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 3.1.8 의 1, 2번 전자석에 의해서도 process chamber 쪽으로 강한 flux line 이 형성되고 있기 때문에 이로 인해 substrate 중심으로부터 수직축 방향으로 멀어질수록 magnetic flux density 가 증가할 것이라고 생각할 수 있다. 그러나 substrate 중심으로부터 RF window 까지 약 17cm 에 해당하는 거리 내에서는 여전히 7번 전자석의 영향이 강하기

때문에 오히려 substrate 중심에서 수직축 방향으로 멀어짐에 따라 magnetic flux density 가 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 M-ICP case 1 및 case 2 각각의 경우에 대하여 전자석에 서로 다른 세기의 전류를 인가한다고 할지라도 전류의 방향이 동일한 한에서는 magnetic flux density 의 공간적인 분포 경향이 크게 다르지 않았다.

결국, 구성된 M-ICP 장치에서 모든 전자석에 시계 방향으로 동일한 세기의 전류를 흘렸을 경우 substrate 중심으로부터 반경 방향과 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 일정하거나 감소함을 알 수 있는데 이를 그림 3.2.2 에서 다시 확인할 수 있다. 그렇다면 반경 방향 및 수직축 방향에 따른 magnetic flux density 가 일정하거나 감소하는 것이 과연 식각 공정에 있어서 바람직하게 작용할 수 있는지, 아니면 이와는 다른 형태의 최적화된 magnetic flux density 의 공간 분포가 존재하는 것인지 생각해 볼 필요가 있는데 이에 대해서는 3.2.2 절에서 논의해 보도록 하겠다.

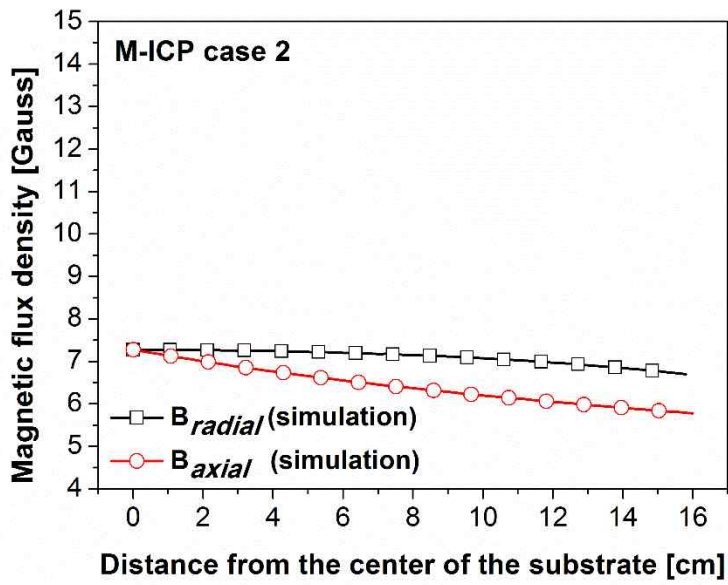
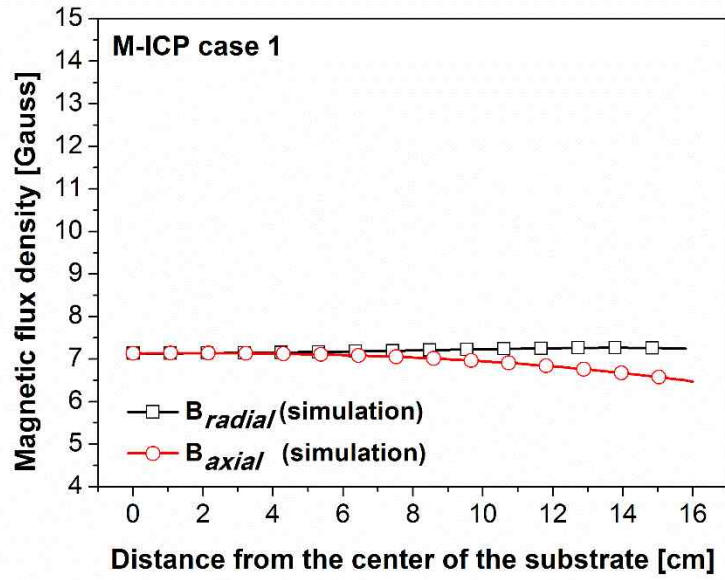


그림 3.2.2 M-ICP case 1 (위) 과 case 2 (아래) 에서  
반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

### 3.2.2 자기장의 최적화된 공간 분포 형성에 관한 이론적 고찰

Substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 는 동일하다고 할지라도 이로 부터 반경 방향 혹은 수직축 방향 (혹은 Substrate 중심으로부터의 수직 거리가 증가하는 방향) 으로 자기장의 공간적인 분포가 어떻게 이루어지느냐에 따라 플라즈마의 방전 특성은 달라질 수 있다. 특히 플라즈마 밀도의 gradient 가 존재하는 시스템 상에서 자기장을 인가하였을 경우 특수한 상황에서 flute instability 라는 현상이 발생하는데 이에 대해서 먼저 알아보고자 한다.

Flute instability (Rayleigh-Taylor instability 혹은 Interchange instability 라고도 부른다.) 는 그림 3.2.3 과 같이 자화된 플라즈마에서 생기는 밀도의 gradient 와 반대 방향으로 작용하는 힘  $\vec{F}$  에 의해 발생할 수 있는 현상이며, 이 힘  $\vec{F}$  는 상황에 따라 gravitational force 가 될 수도 있고 뒤이어 설명할 휘어진 자기장에 의해 particle 이 받는 centrifugal force 등이 될 수도 있다[40]. 쉽게 말해 가벼운 액체보다 무거운 액체가 위에 있는 경우, 중력이 존재함으로 인해서 예상되는 이후의 현상과 비슷하다고 볼 수 있다. 만약 charge sign 의 영향을 받지 않는  $\vec{F}$  가 자기장  $\vec{B}$  에 수직한 방향으로 작용한다고 가정했을 때, 이러한  $\vec{F}$  에 의해 전자와 이온은  $\vec{v}_F$  의 속도로 서로에 대해 반대 방향으로 drift 를 하면서 charge separation 이 발생한다. 그로 인해 그림의 왼쪽 맨 아래와 같이 전기장  $\vec{E}$  이 형성되고  $\vec{v}_E$  의 속도로  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift 가 발생하면서 perturbation 이 증폭되어 결과적으로 flute instability 라고 불리는 현상이 발생하게 된다.

특히, 공간상의 자기장 분포가 일정하지 않고 휘어지거나 (Curvature) 경사가 질 경우 (Gradient) 위와 같은 현상이 일어날 수 있다.  $\nabla B$  가 존재할 때 charged particle 의 gyro-motion 에 의한 magnetic moment  $\mu$  및 힘  $F$  는 다음과 같다[40].



$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} \quad (3.2.1)$$

$$\vec{F}_{\mu} = -\mu \nabla_{\perp} B \quad (3.2.2)$$

또한 자기장이 휘어있을 때 particle 은 원심력을 받게 되며 그 크기는 아래와 같다.

$$\vec{F}_c = -mv_{\parallel}^2 \vec{e}_{\parallel} \cdot (\nabla \vec{e}_{\parallel}) \quad (3.2.3)$$

식 3.2.1 과 3.2.3 의  $v_{\perp}$  와  $v_{\parallel}$  는 각각 자기장  $\vec{B}$  에 수직 혹은 수평으로 작용하며 식 3.2.3 에서  $\vec{e}_{\parallel} = \vec{B}/B$  이다. 그리고  $\vec{F}_{\mu}$  와  $\vec{F}_c$  는 charge sign 의 영향을 받지 않기 때문에 앞에서 말한 바와 같이 flute instability 의 원인이 될 수 있다. 특히 저압에서 형성된 플라즈마의 경우  $\vec{e}_{\parallel} \cdot (\nabla \vec{e}_{\parallel}) = \nabla_{\perp} \ln B$  이므로  $\vec{F}_{\mu}$  와  $\vec{F}_c$  를 더하게 되면 아래와 같다.

$$\vec{F} = \vec{F}_{\mu} + \vec{F}_c = -m \left( \frac{v_{\perp}^2}{2} + v_{\parallel}^2 \right) \nabla_{\perp} \ln B \quad (3.2.4)$$

위와 같이 자기장의 분포가 일정하지 않을 때 힘  $\vec{F}$  는 particle 의 속도에 의해 결정되며 공간상에 분포한 particle 이 받게 될 평균적인 힘  $\langle \vec{F} \rangle$  는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\langle \vec{F} \rangle = \frac{\int d\vec{v} f_0 \vec{F}}{\int d\vec{v} f_0} = -2T \nabla_{\perp} \ln B \quad (3.2.5)$$

따라서 자기장이 휘어지거나 경사가 질 경우, magnetic gradient 와 density gradient 의 방향이 동일할 때 flute instability 가 발생하게 됨을 알 수 있다[40]. 특히 일반적인 plasma etcher 의 경우 제 2 장에서 설명한 바와 같이 밀도가 일정하지 않을 때 반경 방향으로 확산으로 인한 손실이 발생하면서 density gradient 가 감소하기 때문에 이와 반대로 magnetic gradient 는 반경 방향으로 증가해야 flute instability 가 발생하지 않을 것임을 유추해 볼 수 있다.

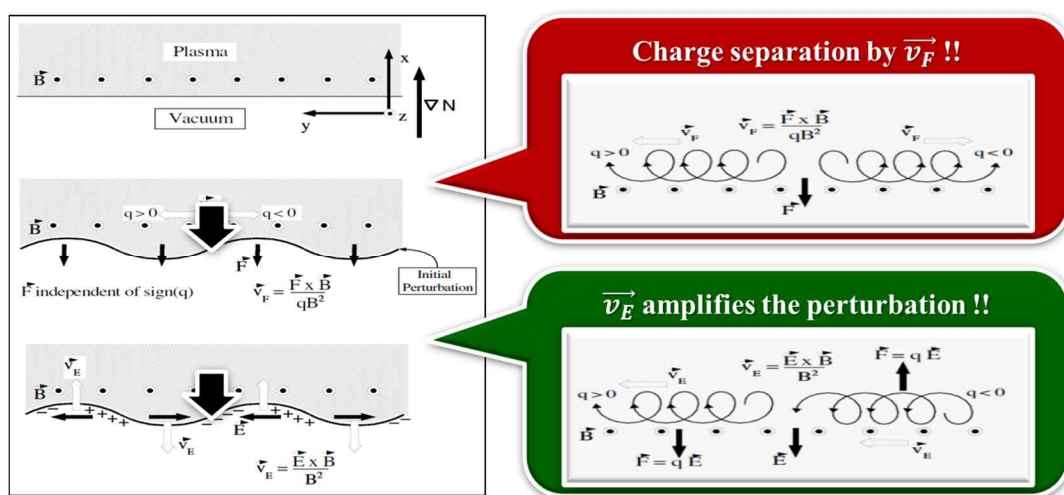


그림 3.2.3 Flute instability 의 발생 원리[40]

한편 수직축 방향 (혹은 substrate 중심으로부터 수직 거리가 증가하는 방향) 의 경우 R-wave 의 전파 관점에서 올바른 자기장의 분포를 생각해 보아야 한다. 제 2 장에서 M-ICP 장치에서는  $\omega < \omega_{ce}$  ( $\omega$  는 input power 의 frequency) 인 조건에서 자기장에 평행한 방향으로 R-wave 가 전파하고 이 wave 에 의한 electron heating 이 가능하다고 기술한 바 있다. 만약 substrate 중심에서 혹은 substrate 중심으로부터 수직 방향으로 어느 정도 떨어진 높이에서 ECR (electron

cyclotron resonance) 가 발생한다고 했을 경우 (본 M-ICP 장치는 약 9.6Gauss 일 때 발생한다고 설명한 바 있다.) 그림 3.2.4 와 같이 자기장이 수직축 방향으로 증가해야  $\omega < \omega_{ce}$  의 관계가 항상 성립하는데 이는  $\omega_{ce}$  가 자기장  $B$  에 비례하기 때문이다.

따라서 앞에서 설명한 내용들을 정리하면, flute instability 가 발생하지 않는 플라즈마의 형성과 R-wave 의 전파로 인한 electron heating 을 기대하기 위해서는 반경 방향 및 수직축 방향의 자기장이 모두 증가해야 함을 알 수 있다.

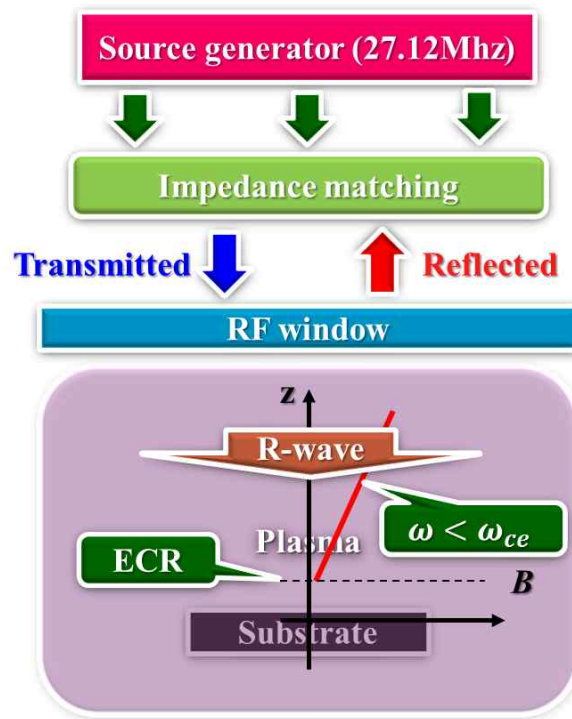


그림 3.2.4 R-wave 가 전파하기 위한 수직축 방향의 자기장 분포

### 3.2.3 M-ICP case 3~7 에서의 자기장의 공간 분포

그렇다면 이제 substrate 중심에 대하여 반경 방향 및 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가할 수 있도록 전자석을 구성해 보는 것이 필요한데 방법은 간단하다. 3.2.1 절에서 소개된 M-ICP case 2 의 경우, substrate 로부터 상대적으로 가까운 거리에 위치한 6번 혹은 7번 전자석에 의해 substrate 중심의 magnetic flux density 가 강해지는데 이 전자석에 반시계 방향 (시스템 위에서 보았을 때의 인가 방향) 의 전류를 인가한다면 substrate 중심의 magnetic flux density 가 약해지면서 상대적으로 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가할 수 있다. 본 절에서는 플라즈마 형성 및 대면적 공정에 최적화된 환경을 찾아내기 위해 자기장의 공간적인 분포를 최대한 다양하게 만들어주고자 하였고 이를 위해 전자석의 개수, 반시계 방향의 전류를 인가한 전자석의 위치 등을 바꾸어 가며 실험을 진행하였다.

표 3.2 는 전자석 개수, 반시계 방향의 전류를 인가한 전자석의 위치 등에 따라 실험한 5가지 조건 (M-ICP case 3~7) 의 전자석 설정 조건을 정리한 것이다. 기본적으로 3.2.1 절의 M-ICP case 1 및 case 2 와 마찬가지로 substrate 중심에서의 자기장의 세기가 7Gauss 가 되도록 전자석 조건을 설정하였다. M-ICP case 3 와 case 4 에서는 3개의 전자석을 사용하였으며 반시계 방향의 전류를 인가한 전자석의 위치에 따른 (6번 혹은 7번) 자기장의 공간 분포 및 플라즈마 방전 특성을 비교해볼 수 있다. Case 5 에서는 6번과 7번 전자석 모두 반시계 방향의 전류를 인가하였고 총 4개의 전자석을 사용하였다. Case 6 와 case 7 에서는 1번과 2번 전자석을 추가하여 총 6개의 전자석을 사용하였고 case 3 및 case 4와 마찬가지로 반시계 방향의 전류를 인가한 전자석의 위치에 따른 (6번 혹은 7번) 자기장 분포 및 플라즈마 방전 특성을 비교해볼 수 있다. 3.2.2 절에서 살펴본

내용들을 토대로 반경 방향 혹은 수직축 방향의 자기장의 세기를 증가시키기 위해 5가지 경우 모두 반시계 방향의 전류가 흐르는 전자석을 공통적으로 사용하였으며 3.2.1 절에서 했던 것과 마찬가지로 FEMM 시뮬레이션을 활용하여 자기장의 공간적인 분포를 살펴보았다.

|        | 1     | 2     | 4     | 5     | 6      | 7      | $B_{substrate}$ |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------------|
| Case 3 | N/A   | N/A   | 500mA | 500mA | -750mA | N/A    | 7Gauss          |
| Case 4 | N/A   | N/A   | 500mA | 500mA | N/A    | -750mA |                 |
| Case 5 | N/A   | N/A   | 750mA | 750mA | -750mA | -750mA |                 |
| Case 6 | 350mA | 350mA | 350mA | 350mA | -750mA | 350mA  |                 |
| Case 7 | 330mA | 330mA | 330mA | 330mA | 330mA  | -750mA |                 |

표 3.2 M-ICP case 3~7 의 전자석 설정 조건

그림 3.2.5 와 3.2.6 에는 FEMM 시뮬레이션을 활용하여 살펴본 상기 5가지 조건에 대한 자기장의 공간 분포가 나타나 있다. 전체적으로 6번 혹은 7번 전자석에 반시계 방향의 전류가 인가됨으로 인해 substrate 중심 부근의 magnetic flux density 가 가장 작고 반경 방향으로 증가할수록 커짐을 알 수 있으며 case 3, 4, 5 의 경우 4번 전자석으로부터, case 6, 7 의 경우 1, 2, 4번 전자석으로부터 process chamber 내 RF window 쪽으로 flux line 이 발생하면서 결과적으로 수직축 방향의 magnetic flux density 도 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이를 그림 3.2.7~ 그림 3.2.9 에 정량적으로 다시 나타냈다.

결과적으로 반경 방향 및 수직축 방향의 magnetic flux density 가 증가하도록 전자석을 구성하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 이제 3.2.1 절과 3.2.3 절에서 살펴본 7가지 조건에 대하여 3.3 절에서는 DLP (Dual Langmuir Probe) 를

활용하여 플라스마 밀도 및 전자 온도 등을 측정해 봄으로써 반경 방향 및 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가하는 것이 (Case 3~7) 그렇지 않은 경우 (Case 1, 2) 에 대비하여 정말로 대면적 공정의 관점에서 식각 환경에 유리하게 작용할 수 있는지, 또한 자기장의 공간 분포가 유사한 case 3~7 은 플라스마 방전 특성에서 차이점이 나타나는지 등에 대해 살펴보도록 하겠다.

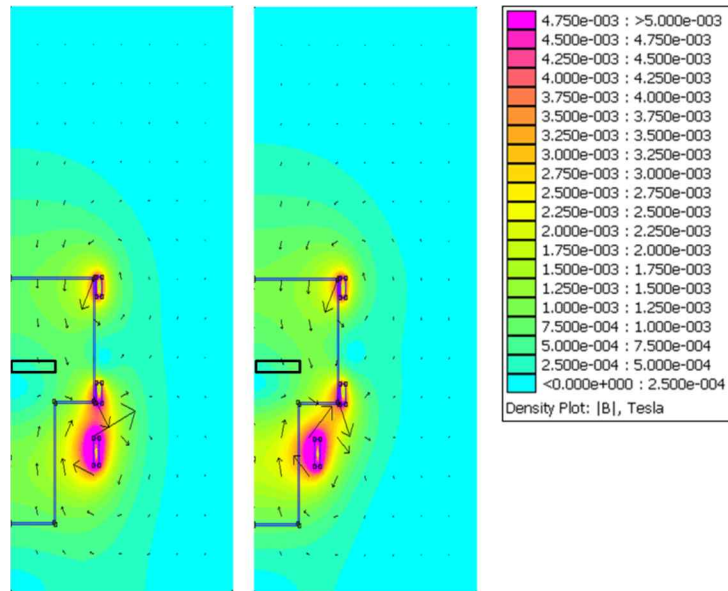


그림 3.2.5 M-ICP case 3 (왼쪽) 과 case 4 (가운데) 에서의 공간적인 자기장 분포

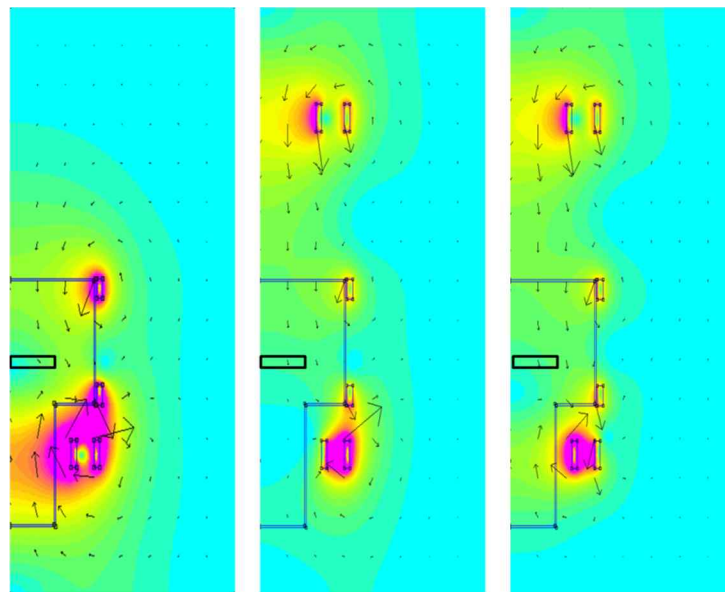


그림 3.2.6 M-ICP case 5 (왼쪽), case 6 (가운데), case 7 (오른쪽) 에서의  
공간적인 자기장 분포

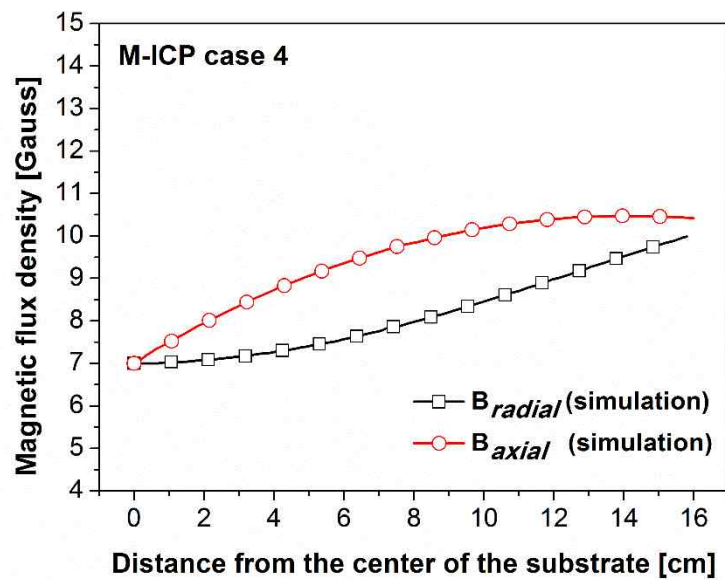
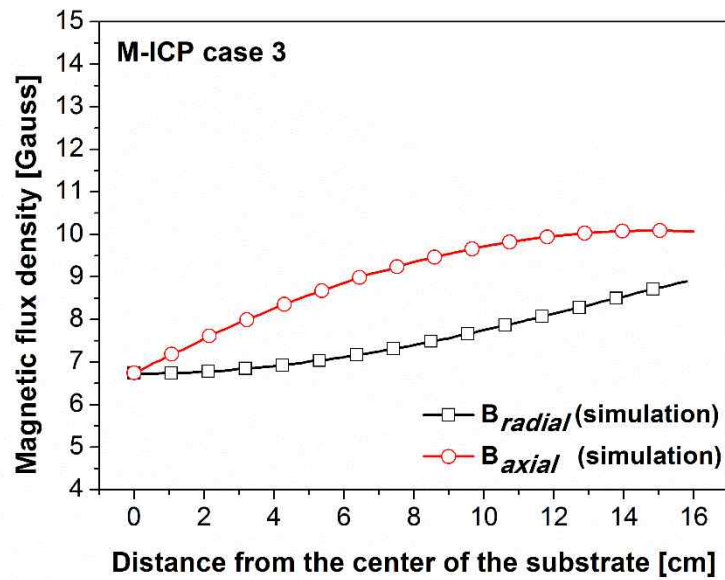


그림 3.2.7 M-ICP case 3 (위) 과 case 4 (아래) 에서  
반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포



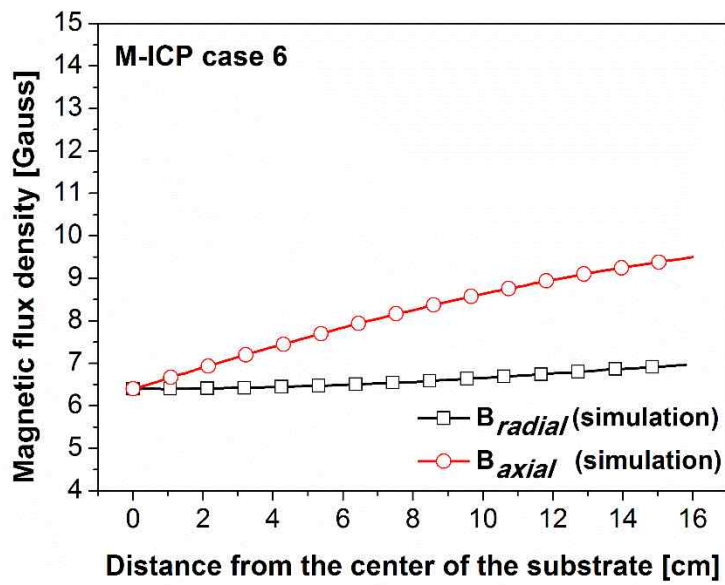
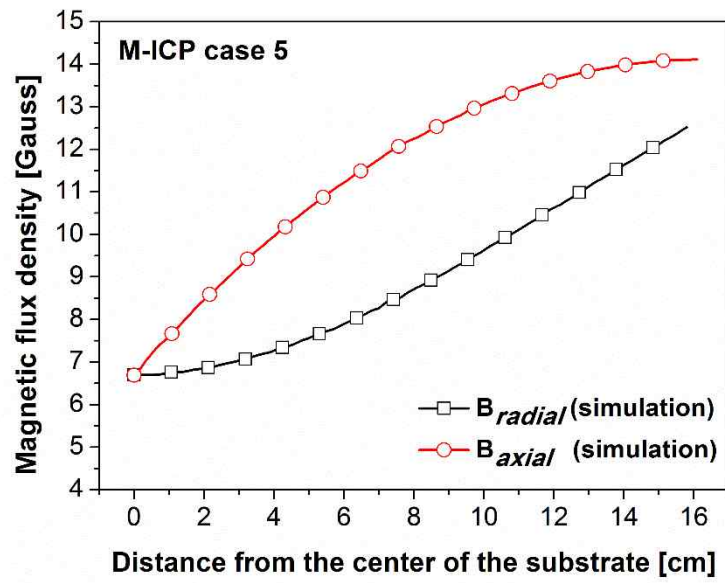


그림 3.2.8 M-ICP case 5 (위) 와 case 6 (아래) 에서  
반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

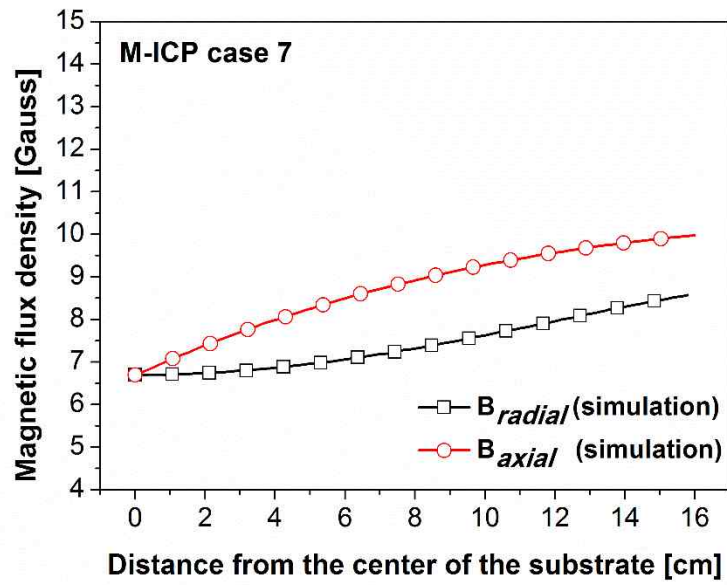


그림 3.2.9 M-ICP case 7 에서  
반경 방향 및 수직축 방향에 따른 자기장의 공간 분포

### 3.3 ICP 및 M-ICP 장치의 방전 특성 비교

#### 3.3.1 Langmuir probe 를 활용한 플라스마 진단 방법

Langmuir probe 를 활용한 플라스마 방전 특성 평가는 가장 대표적인 플라스마 진단 방법 중 하나이다. Langmuir 가 고안한 이 측정 방법은 플라스마 발생기 내부에 탐침을 삽입하고 전압을 인가했을 때 탐침에 흐르는 전류를 측정해내는 것인데 이를 통하여 플라스마 밀도, 전자 온도, 플라스마 전위, 전자 에너지 분포함수 (EEDF) 등을 파악할 수 있다. 본 논문에서도 반경 방향 혹은 수직 축 방향의 자기장 분포에 따른 플라스마 밀도 및 전자 온도 특성을 파악하기 위해 이 방법을 사용하였다. Langmuir probe 의 종류는 플라스마에 노출되는 전극의 개수에 따라 single Langmuir probe, dual (혹은 double) Langmuir probe, triple Langmuir probe 등으로 나뉜다. 본 절에서는 이 중 dual Langmuir probe 를 사용하였고, 이에 dual Langmuir probe 를 활용한 플라스마 밀도 및 전자 온도를 측정하는 원리 및 방법에 대하여 살펴보고자 한다.

Dual Langmuir probe 측정법은 2개의 전극 사이에 isolated voltage 를 인가하는 방식이다[33, 41]. 이 두 전극은 ground 에 대하여 floating 상태에 놓여져 있기 때문에 두 전극에 전위차를 발생시키기 위한 전원부와 플라스마는 완벽한 폐회로를 이룬다. 그리고 한 쪽 전극에서 이온 전류가 흐르면 다른 쪽 전극에서는 정확히 같은 양의 전자 전류가 흘러 마치 전자 전류가 이온 전류에 의해 제한되는 듯한 형태를 이루며 이온의 이동도 (mobility) 가 전자의 그것보다 훨씬 작아 회로 상에는 미세한 양의 전류만 흐른다. 또한 측정 시스템 전체가 floating 상태에 놓여 있기 때문에 플라스마 전위가 시간에 따라 진동해도 그 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 single Langmuir probe 측정법 대비 노이즈에 강한 장점

이 있지만 이온 포화 전류만을 이용하기 때문에 이를 통해 얻을 수 있는 물리량이 상대적으로 적다는 단점이 있다. 그림 3.3.1[33]에는 dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve 가 나타나 있는데 그래프가 원점에 대하여 대칭을 이루고 있으며 전류값은 probe 의 이온 포화 전류에 의해 제한된다.

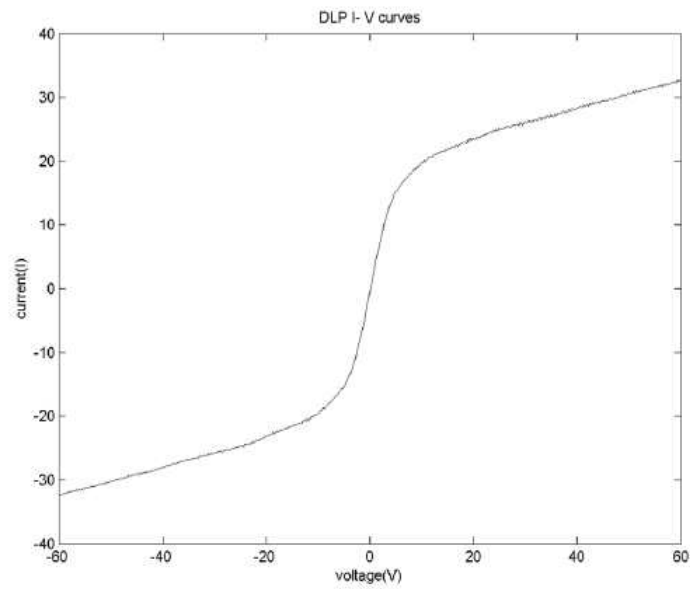


그림 3.3.1 Dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve[33]

한편, dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I = I_p \tanh\left(\frac{V}{2T_e}\right) \quad (3.3.1)$$

위 식을 미분하면,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{2I_p \exp\left(\frac{V}{T_e}\right)}{T_{ev} \left(\exp\left(\frac{V}{T_e}\right) + 1\right)^2} \quad (3.3.2)$$

으로 표현되며  $V$  에 0 을 대입한 후 정리하면,

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0} = \frac{I_p}{2T_e} \quad (3.3.3)$$

와 같다. 위 식에서  $I_p$  는 그림 3.3.2 에서 I-V curve 를 선으로 근사한 1번과 2 번의 y 절편 절대값의 평균값이고  $V=0$  일 때의 curve 의 기울기를 의미하는 3 번이 식 3.3.3 의 좌변에 해당한다. 이를 이용하여 식 3.3.3 의 우변에 나타나 있는 전자 온도를 구할 수 있다.

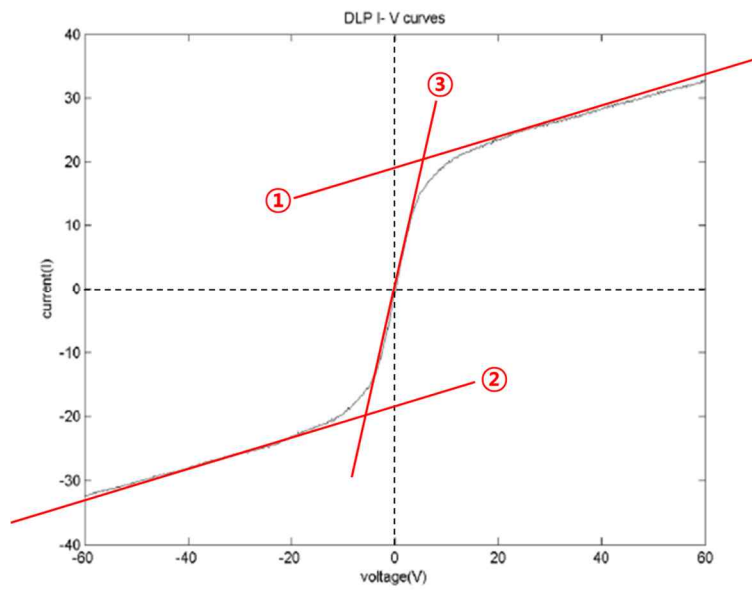


그림 3.3.2 Dual Langmuir probe 측정법을 통해 구한 I-V curve 의 근사화

### 3.3.2 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 특성 진단

3.3.2 절에서는 3.2.1 절과 3.2.3 절에서 살펴본 7가지 case 에 대해 dual Langmuir probe 를 활용하여 측정한 플라즈마 밀도 및 전자 온도 특성에 대하여 살펴보도록 하겠다. 먼저 앞에서 살펴본 7가지 case 에서 나타난 자기장의 공간적인 분포를 다시 한번 간략하게 요약한 결과가 표 3.3 에 제시되어 있다. 모든 경우에 대해 substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 를 7Gauss 로 고정하였으며 반시계 방향으로 전류를 인가한 전자석은 밀줄 표시를 하였다.  $B_{RADIAL}$  은 substrate 중심으로부터 반경 방향으로의 자기장의 분포를 의미하며  $B_{AXIAL}$  은 substrate 중심으로부터 수직 높이가 증가하는 방향으로의 자기장의 분포를 의미한다. 여기서 중점적으로 관찰할 사항은 크게 두 가지로 하나는 case 3~7 이 case 1 이나 case 2 대비 식각 환경에 유리한 플라즈마 방전 특성을 보여줄 것인가, 다른 하나는 자기장의 공간적인 분포 경향이 비교적 비슷한 case 3~7 사이에서도 플라즈마의 방전 특성이 달라질 수 있는가 하는 점이다.

|        | 전자석                       | $B_{RADIAL}$ | $B_{AXIAL}$ | $B_{substrate}$ |
|--------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
| Case 1 | 4, 5번                     | 일정           | 감소          | 7Gauss          |
| Case 2 | 1, 2, 4, 5, 6, 7번         | 감소           | 감소          |                 |
| Case 3 | 4, 5, <b>6</b> 번          | 증가           | 증가          |                 |
| Case 4 | 4, 5, <b>7</b> 번          | 증가           | 증가          |                 |
| Case 5 | 4, 5, <b>6, 7</b> 번       | 증가           | 증가          |                 |
| Case 6 | 1, 2, 4, 5, <b>6</b> , 7번 | 약간 증가        | 증가          |                 |
| Case 7 | 1, 2, 4, 5, 6, <b>7</b> 번 | 증가           | 증가          |                 |

표 3.3 M-ICP case 1~7 의 자기장 공간 분포 결과 요약

플라즈마 밀도 및 전자 온도 측정에 필요한 dual Langmuir probe 및 전압 인가 회로는 연구실에서 자체 제작하였다[33]. 실제로 측정할 때 probe 에 흐르는 전류량 자체가 매우 적은데다가 RF 환경에 노출되어 전류량을 제대로 파악하는 것이 힘든데, 이를 해결하기 위해 간단하게 저항을 연결하여 전류량을 측정할 수 있도록 하였고 적절하게 설계된 차동 증폭기를 이용하여 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하였다.

한편, 측정된 신호를 컴퓨터로 전송 및 분석하기 위하여 National Instrument 社 의 NI-DAQ 를 이용하여 프로그램을 별도 제작하였다[33]. 그리고 DAQ 는 컴퓨터와 직접 연결되어 dual Langmuir probe 가 floating 상태에 놓여 있지 않기 때문에 AD-215 라는 Isolation Amp. 로 출력 전압을 분리할 수 있도록 하였다.

플라즈마 밀도 및 전자 온도 측정은 기본적으로 5mT, 10mT 의 두 가지 압력 조건 하에서 이루어졌다. 방전 가스로는 Ar 을 사용하였고 60sccm 의 total flow rate 를 유지하였다. Source power (27.12MHz) 는 1000W<sub>s</sub> 를 인가하였으며 bias 전극은 ground 를 유지하였다. 측정은 bulk plasma 에서 이루어지되 substrate 근처의 정보를 알아내기 위하여 probe tip 을 substrate 중심으로부터 약 0.8cm 떨어진, 육안상으로 보았을 때 dark space 영역을 살짝 벗어난 높이에 위치하도록 했으며 substrate 중심으로부터 반경 방향으로 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16cm 떨어진 거리에서 측정을 진행하였다. 또한 측정 전에 항상 tip cleaning 을 진행하였는데 이는 tip 의 재료로 쓰인 텅스텐의 표면이 대기 중에 장기간 노출될 때 오염으로 인한 얇은 절연막이 증착되면서 tip 으로 흐르는 전류량이 제한될 수 있기 때문이다. 참고로 플라즈마가 발생 및 유지되는 상태에서 tip 에 플라즈마 전위 이상의 전압을 DC power supply 를 통해 인가하면 tip 이 가열됨으로 인해 간단하게 오염 물질이 제거될 수 있다.

그림 3.3.3 과 그림 3.3.4 에는 각각 5mT 와 10mT 압력 하에서 측정한 M-ICP



case 1~7 의 플라즈마 밀도 및 전자 온도의 반경 방향에 따른 분포가 ICP (0Gauss) 와 함께 나타나 있다. 그리고 그림 3.3.5 에는 substrate 중심에서 측정된 플라즈마 밀도 및 전자 온도가 나타나 있다. 그림들을 잘 살펴 보면, ICP 및 M-ICP case 1 ~ case 7 에서 측정된 전자 온도는 큰 차이를 보이지 않는 반면, 플라즈마 밀도 분포에서 확연한 차이점을 발견할 수 있다. 먼저 측정된 플라즈마 밀도의 경우 M-ICP case 5, case 6, case 7 에서 가장 높았으며 M-ICP case 2, case 3, case 4 의 경우 그보다 약간 낮은 것으로 나타났다. 두 개의 전자석만을 사용한 M-ICP case 1 의 경우 ICP 대비 여전히 플라즈마 밀도가 높았지만 자기장을 인가함에 따른 플라즈마 밀도 상승 효과가 현저하게 낮았다. 즉, 그림을 보았을 때 플라즈마 밀도의 대소 관계를  $ICP < M-ICP \text{ case } 1 < M-ICP \text{ case } 2, 3, 4 < M-ICP \text{ case } 5, 6, 7$  정도로 정리할 수 있다. 이는 자기장을 인가하는 방법 및 공간적인 분포가 효과적인 plasma confinement 에 결정적인 요인이 될 수 있음을 말해준다.

실제로 자기장의 형성으로 인한 plasma confinement 효과는 그림 3.3.6 의 왼쪽 으로부터 설명할 수 있다[1]. 자기장 내에 존재하는 particle 은 수평 성분과 수직 성분의 속도를 가지기 때문에 자기장에 대하여  $\theta$  만큼 벌어진 각도로 이동을 하는데 (여기서  $\theta$ 는 pitch angle 이라고 불린다.) 그림 3.3.6 의 왼쪽과 같은 converging magnetic field 내부에서는 자기장이 증가함에 따라 수직 성분의 속도는 증가하는 반면 total particle energy 는 변하지 않을 경우 ( $E = 0$ ) 수평 성분의 속도는 감소한다. 따라서 자기장을 따라 움직이던 particle 의 속도는 점점 낮아 지는데 field convergence 가 잘 이루어지면, particle 의 수평 성분의 속도가 마침내 0 이 되는 지점에 도달하게 된다. 반면, mirror force ( $F_z = -\mu \frac{\partial B_z}{\partial z}$ ) 는 여전히  $-B$  의 방향으로 작용하기 때문에 particle 은 진행해 오던 방향과 반대로 되돌아 온다. 이러한 현상을 magnetic mirroring 혹은 magnetic trap 이라고 한다.

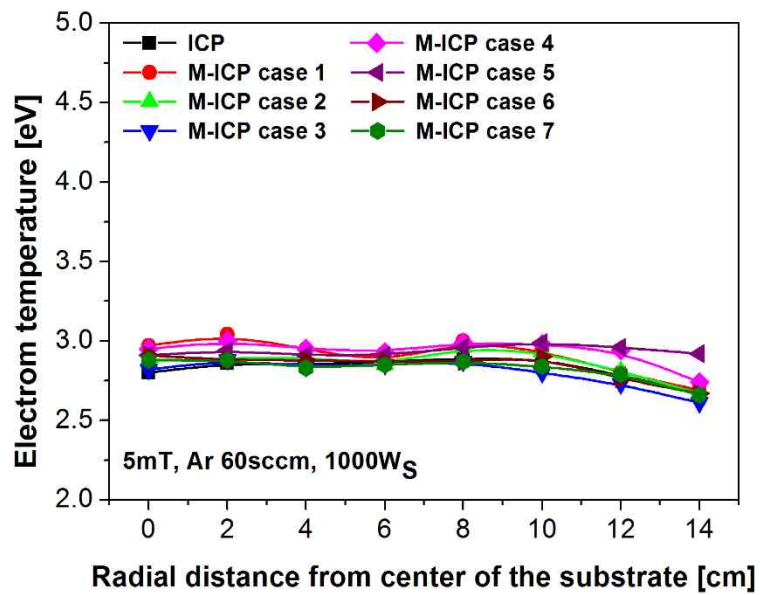
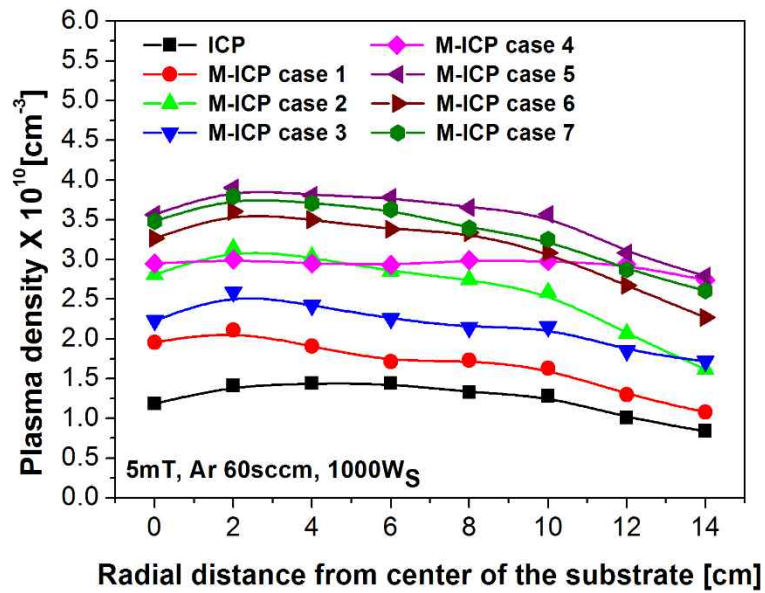


그림 3.3.3 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래) : 5mT

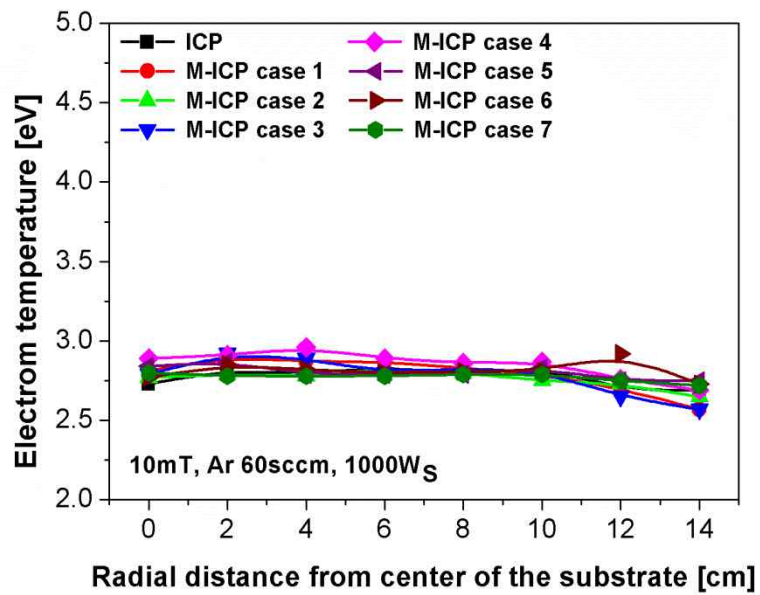
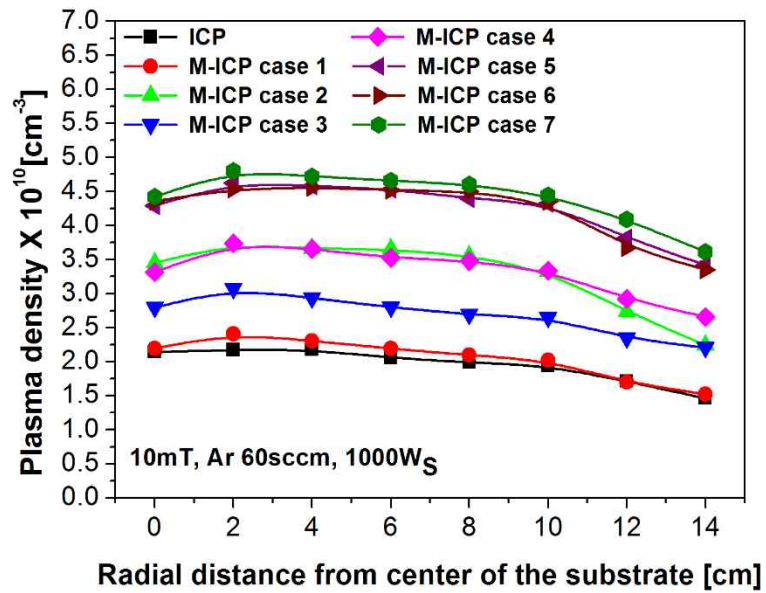


그림 3.3.4 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래) : 10mT

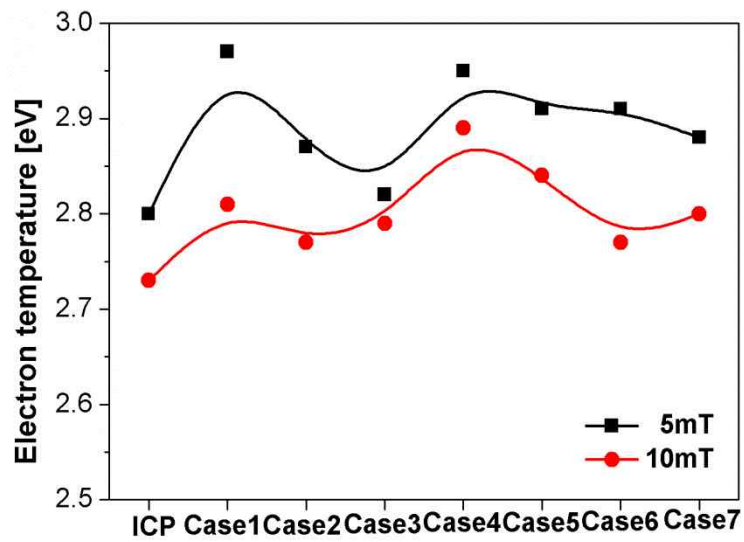
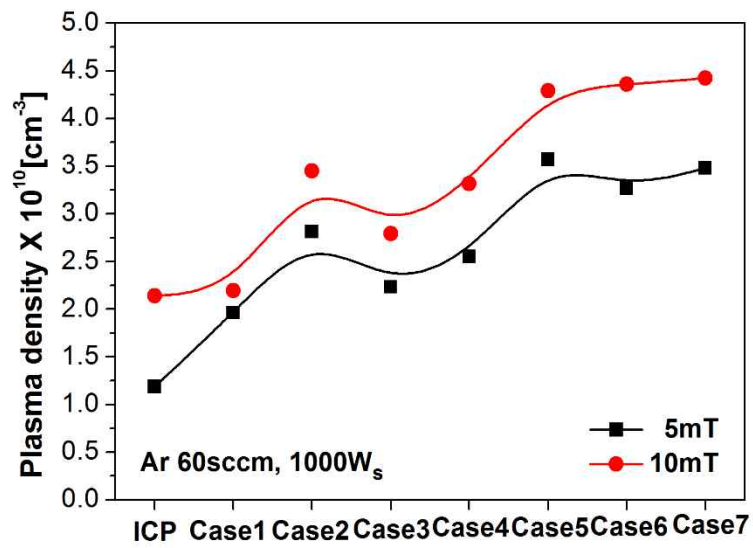


그림 3.3.5 Substrate 중심에서 압력별 플라즈마 밀도 (위) 및 전자 온도 (아래)

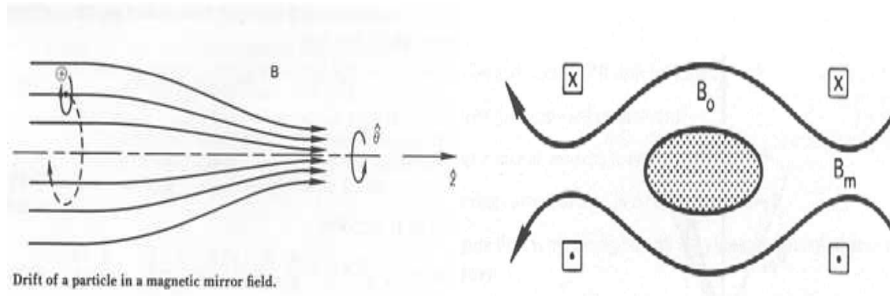


그림 3.3.6 Magnetic mirror field 에서의 particle 의 움직임 (왼쪽) 및 plasma confinement (오른쪽)

그러나 converging field 가 형성되어 있다고 해서 무조건 particle 의 confinement 가 이루어지는 것은 아니다. Particle 의 confinement 를 위해서는 particle 의 pitch angle 이 특정한 조건을 만족해야 한다. 그림 3.3.6 의 오른쪽 과 같이  $B_0$  부터  $B_m$  까지 매끄럽게 증가하는 자기장이 형성되어 있을 때 mirror ratio ( $R_m$ ) 라고 불리는 물리량은 아래와 같이 정의할 수 있다[1].

$$R_m = \frac{B_m}{B_0} \quad (3.3.4)$$

그리고 아래와 같은 조건이 성립할 때 비로소 particle 이 진행 방향의 반대쪽으로 되돌아오는 confinement 효과를 기대할 수 있다.

$$\theta \geq \theta_m = \sin^{-1} \left( R_m^{-1/2} \right) \quad (3.3.5)$$

만약 위의 조건을 만족하지 않을 경우 particle 은 자기장에 의해 형성된 mirror

를 탈출하게 된다. 따라서 자기장 내에 존재하는 particle 의 confinement 효과를 극대화 하기 위해서는  $\theta_m$  이 작아야 하며, 결과적으로  $R_m$  은 큰 것이 좋다.

이러한 점에 착안하여 그림 3.3.7 과 같이 M-ICP case 1~7 에 대해 substrate 중심으로부터 수직축 방향으로 1, 2, 3 번 전자석이 위치한 곳까지 높이가 증가함에 따른 magnetic flux density 의 분포를 FEMM 을 통해 확인해 보았다. 먼저 플라즈마 밀도가 가장 높았던 M-ICP case 5, case 6, case 7 을 살펴보면, case 5 의 경우 substrate 부터 RF window 까지 자기장의 세기가 가장 가파르게 증가하고 있기 때문에  $R_m$  값이 가장 크다. 따라서 plasma confinement 효과가 다른 case 보다 뛰어나다. Case 6 및 case 7 의 경우 case 5 만큼  $R_m$  이 크지 않지만 1, 2, 3번 전자석이 위치한 곳까지 magnetic flux density 가 지속적으로 증가하는 분포를 형성하기 때문에 식 3.3.4 의 조건을 만족하는 particle 에 대한 confinement 효과가 유효하여 높은 플라즈마 밀도를 유지할 수 있는 것으로 보인다.

반면 case 3, 4 의 경우 substrate 중심으로부터 수직 방향으로 magnetic flux density 가 증가하여 식 3.3.5 의 조건을 만족하는 particle 에 대한 confinement 효과를 기대할 수 있을 것처럼 보이지만, RF window 의 아래쪽부터 magnetic flux density 가 감소하고 있다. 따라서 RF window 근처로 다가오면서 감소하던 particle 의 수평 성분의 속도가 다시 증가하여 제대로 된 confinement 가 이루어지지 않아 플라즈마 밀도가 case 5, case 6, case 7 에 비해 상대적으로 낮아진 것으로 보인다. 그리고 case 1 및 case 2 는 magnetic flux density 가 지속적으로 감소하기 때문에 plasma confinement 를 기대할 수 없고 이로 인해 자기장을 인가하였음에도 ICP 대비 플라즈마 밀도가 뚜렷하게 향상되지 않은 것으로 보인다.

결과적으로, 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가하도록 M-ICP 장치를 구성하는 것은 3.2.2 절에서 설명한 R-wave 의 전파 뿐만 아니라 plasma confinement 를 위해서도 매우 중요함을 확인해볼 수 있었다.

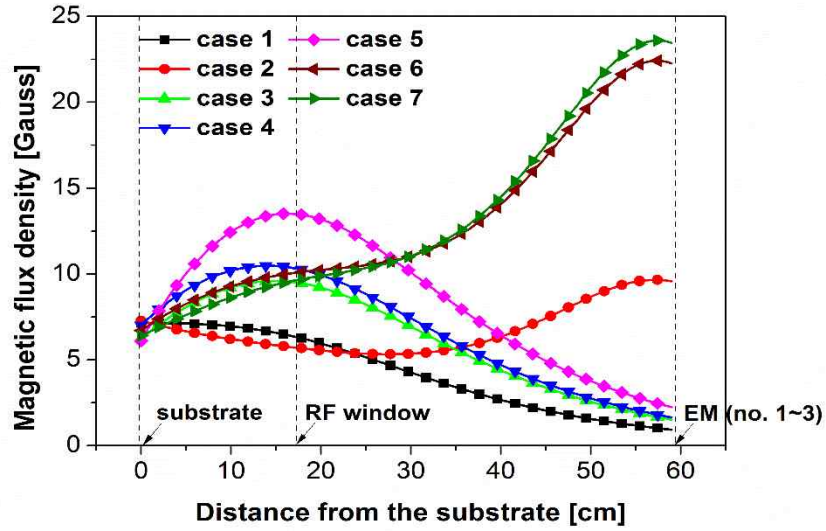


그림 3.3.7 Substrate로부터 수직한 방향으로의 자기장 분포

한편, ICP 및 M-ICP case 1 ~ case 7에 대한 플라즈마 밀도의 반경 방향에 대한 균일도는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$Uniformity \quad (\%) = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max} + n_{min}} \times 100 \quad (3.3.6)$$

그림 3.3.8은 위와 같은 식에 근거하여 계산한 결과로, ICP 혹은 M-ICP case 1이나 case 2 보다는 반경 방향으로 자기장이 증가하도록 구성한 M-ICP case 3 ~ case 7이 밀도의 균일도가 뛰어나다. 3.2.2절에서 M-ICP case 1이나 case 2와 같이 substrate 중심으로부터 반경 방향으로 자기장의 세기가 감소할 경우 flute instability가 발생할 수 있다고 설명한 바 있는데 실제로 이는 GNP (Gold Neutral Beam Probe)를 활용하여 플라즈마 전위나 플라즈마 밀도의 fluctuation

을 측정해 봄으로써 확인할 수 있다고 알려져 있다[42][43]. 본 연구에서는 비록 flute instability 를 직접적으로 측정하지 않았지만 그림 3.3.8 에 나타난 결과는 반경 방향에 따른 자기장의 세기를 증가시키는 것이 flute instability 를 억제하여 플라스마 밀도 균일도 개선에 도움을 준다는 가정을 간접적으로 뒷받침해준다.

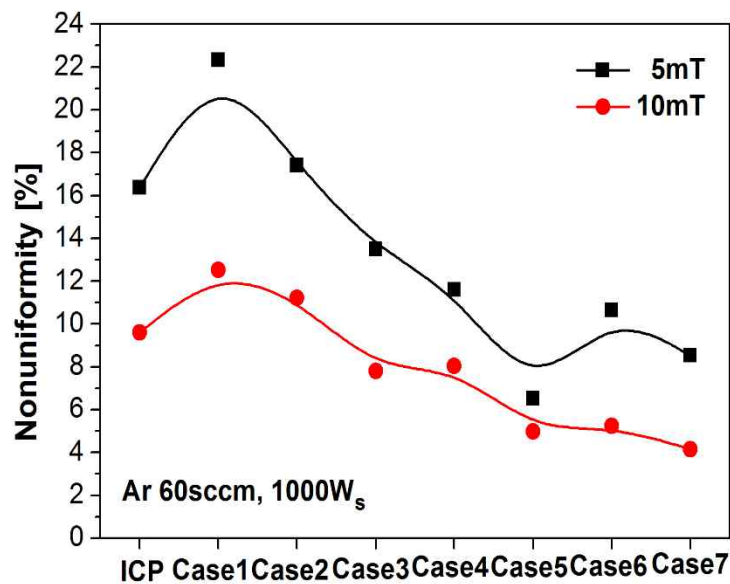


그림 3.3.8 플라스마 밀도의 반경 방향 균일도

상기의 결과들을 종합해 보았을 때 M-ICP case 5, case 6, case 7 의 경우 플라스마 밀도가 가장 높고 반경 방향에 대한 플라스마 밀도 균일도가 뛰어나다. 하지만 case 5 의 경우 case 6 및 case 7 에 비하여 substrate 에 동일한 magnetic flux density 를 형성하기 위해 흘러줘야 하는 전류량이 많아 소비 전력이 크다는 단점이 있어 case 6 이나 case 7 이 시스템 구성 측면에서는 가장 바람직해 보인다.



이후 3.3.3 절에서는 그 중에서도 반경 방향에 따른 플라즈마 밀도 균일도가 좀 더 우수한 case 7 에 대해 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 및 neutral gas pressure 에 따른 플라즈마 방전 특성을 좀 더 자세하게 살펴보고, 4장에서는 ICP 및 M-ICP case 7 의 환경에서 산화물 기반의 HARC 를 식각했을 때 나타나는 특성들을 알아보도록 하겠다.

### 3.3.3 자기장의 세기 변화에 따른 M-ICP case 7 의 플라즈마 특성 진단

3.3.2 절에서는 substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 가 동일한 환경에서 dual Langmuir probe 를 활용하여 M-ICP case 1~7 의 플라즈마 방전 특성을 살펴 보았다. 3.3.3 절에서는 플라즈마 밀도가 높고 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도가 우수하며, 전력 소모가 상대적으로 낮은 M-ICP case 7 의 ICP 대비 플라즈마 방전 특성을 보다 집중적으로 살펴보고자 한다. 먼저 M-ICP case 7 에서 substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density 에 따른 플라즈마 방전 특성을 살펴보고자, 7번 전자석에 반시계 방향으로 흐르는 전류의 세기를 750mA 로 고정한 상태에서 시계 방향으로 다양한 세기의 전류를 1, 2, 4, 5, 6번 전자석에 동시에 인가하였을 때 substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 를 측정해 보았다. 그 결과, 그림 3.3.9 과 같이 1, 2, 4, 5, 6번 전자석에 1A 미만의 전류를 흘려, 0~30Gauss 범위 안에서 substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density 를 자유롭게 제어할 수 있었다.

한편, 그림 3.3.10 과 3.3.11 에는 substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 에 따른 (4, 8, 12, 15, 19, 22, 25Gauss) 자기장의 공간적인 분포를 FEMM 시뮬레이션을 통해 확인한 결과가 나타나 있다. 3.2 절에서 확인한 바와 같이 전반적으로 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가하는 경향을 보여주었으며 이를 Gaussmeter 를 활용하여 실제 정량적으로 측정한 결과가 그림 3.3.12 와 3.3.13 에 나타나 있다. 이처럼 7번 전자석에만 반시계 방향의 전류를 인가하는 간단한 방법으로 substrate 중심에 가해지는 magnetic flux density 와 관계 없이 반경 방향 혹은 수직축 방향 모두 magnetic flux density 가 증가하는 분포를 형성하는 것이 가능하다. 이제 ICP (0Gauss) 를 포함한 M-ICP case 7 에서 나타나는 플라즈마의 방전 특성을 분석해 보기로 하겠다.

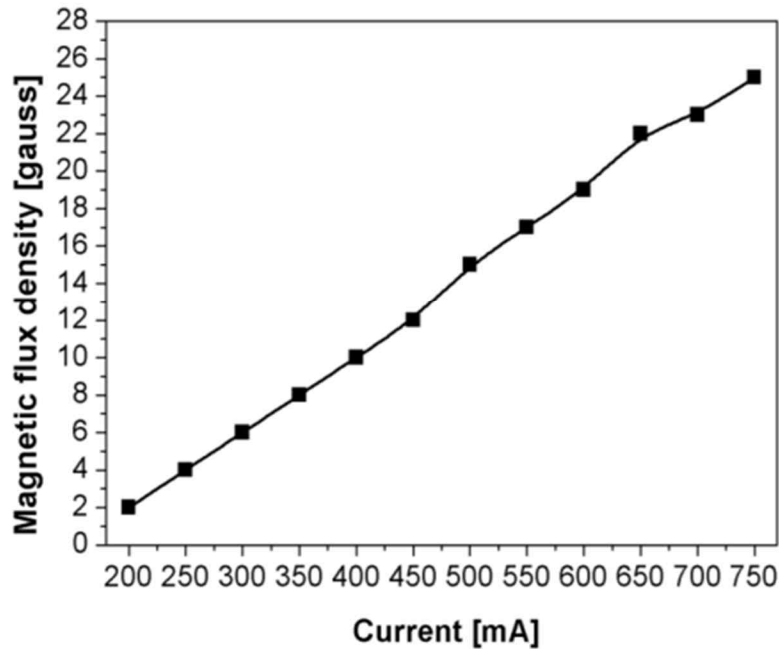


그림 3.3.9 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 substrate 중심에서의 magnetic flux density

플라즈마 밀도 및 전자 온도 측정은 1mT, 5mT, 10mT, 20mT 의 네 가지 압력 조건 하에서 이루어졌다. 방전 가스로는 Ar 을 사용하였고 1mT 의 경우 20sccm, 나머지의 경우 60sccm 의 total flow rate 를 유지하였다. Source power (27.12MHz) 는 1000 W<sub>s</sub> 를 인가하였으며 bias 전극은 ground 를 유지하였다. Process chamber 내부의 플라즈마 밀도 및 전자 온도의 2차원적인 공간적인 분포를 파악하기 위하여 probe tip 이 substrate 중심으로부터 0.8cm, 3.8cm, 6.45cm, 8.5m, 10.5cm, 13cm 떨어진 높이에 위치하도록 하였고 각각의 높이에 대하여 반경 방향으로 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16cm 떨어진 거리에서 측정을 진행하였다.

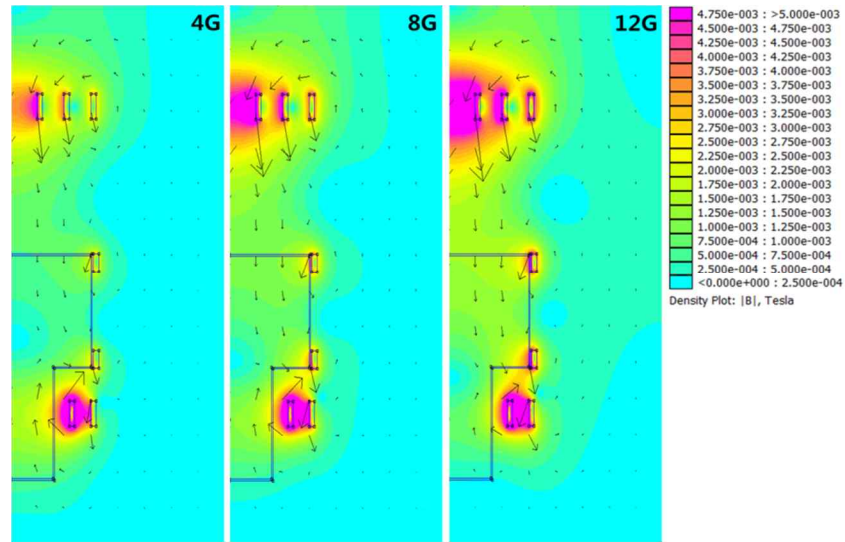


그림 3.3.10 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 공간적인 자기장 분포  
(Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 4, 8, 12Gauss)

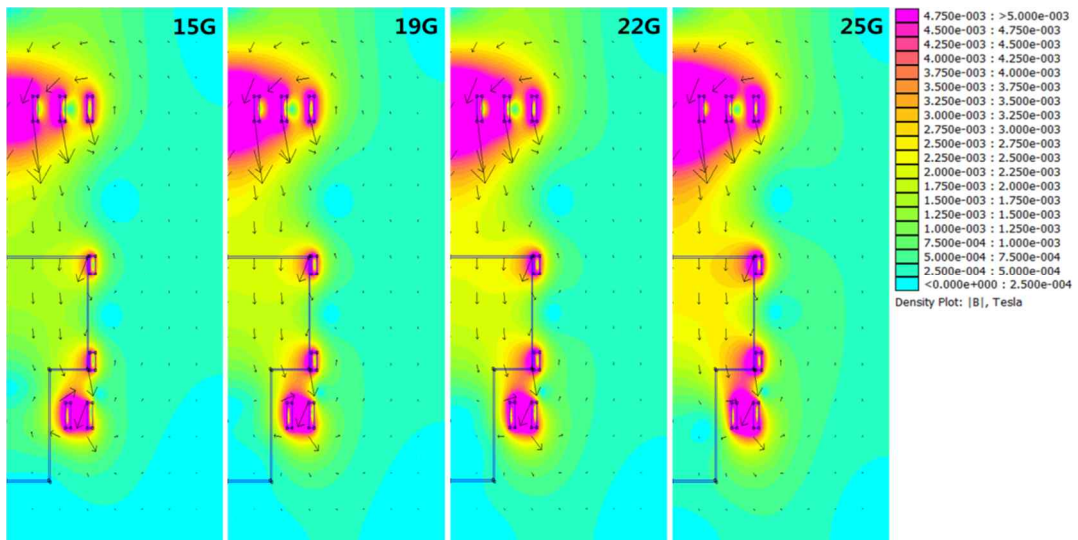


그림 3.3.11 M-ICP case 7 에서 전류 세기에 따른 공간적인 자기장 분포  
(Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 15, 19, 22, 25Gauss)

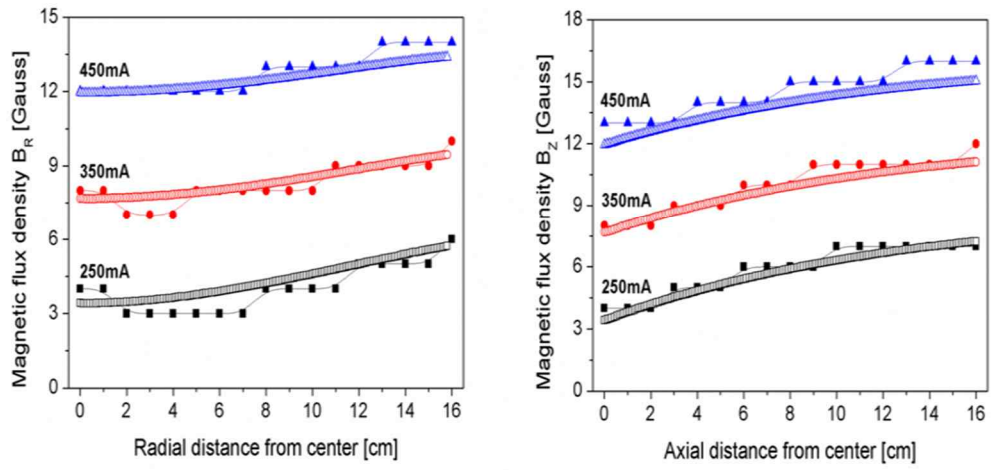


그림 3.3.12 M-ICP case 7 에서 반경 방향 및 수직축 방향의 자기장 분포  
(Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 4, 8, 12Gauss)

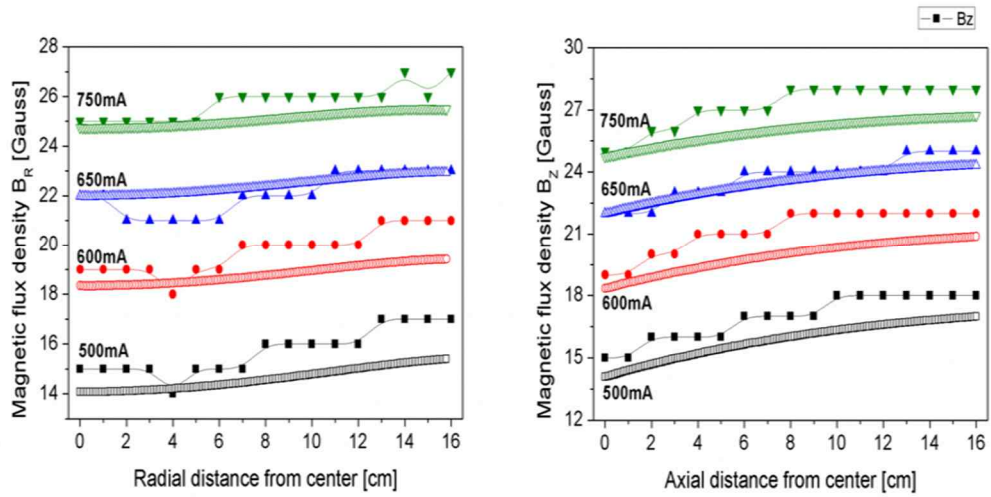


그림 3.3.13 M-ICP case 7 에서 반경 방향 및 수직축 방향의 자기장 분포  
(Substrate 중심에서의 magnetic flux density: 15, 19, 22, 25Gauss)

그림 3.3.14 ~ 그림 3.3.25 는 neutral gas pressure 및 magnetic flux density 의 변화에 따라 측정된 플라스마 밀도 및 전자 온도를 나타낸 것이다. 전반적으로 살펴 보았을 때 플라스마 밀도 및 전자 온도의 분포 경향이 상당히 유사하며 무엇보다도 자기장의 세기가 증가함에 따라 플라스마 밀도 뿐만 아니라 공간에 분포하는 전자의 온도도 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 제 2 장에서 설명하였듯이, ICP 에 자기장을 형성함으로 인하여 process chamber 내부로 R-wave 가 전파하기 때문인 것으로 생각이 되는데 magnetic probe 를 활용하여 time-varying magnetic field 를 측정해 보면 위와 같은 사실을 직접적으로 확인해볼 수 있다. 그림 3.3.26 에는 10mTorr 의 압력에서 측정한 time-varying  $B_z$  field 가 도시되어 있다[33]. 그림에서 보는 바와 같이 ICP (0Gauss) 에서는 RF window 근처에만  $B_z$  field 의 분포가 집중되어 있는 반면 자기장의 세기가 증가할수록 process chamber 내 깊숙한 곳까지  $B_z$  field 가 침투하고 있다. 심지어 substrate 에 인가한 magnetic flux density 가 22Gauss 까지 증가할 경우  $B_z$  field 가 substrate 가 있는 곳까지 침투하고 있음을 알 수 있다. 이는 process chamber 내부로 전파하는 R-wave 에 의해 RF window 로부터 멀리 떨어져 있는, 혹은 substrate 근처에 있는 electron 에게도 energy 가 전달될 수 있음을 의미한다. 이러한 이유로 공간 상에 분포하는 전자의 온도가 ICP 대비 M-ICP 의 환경에서 높아지는 것으로 생각된다. 그림 상의 색 분포를 보더라도 이를 금방 파악할 수 있는데, 측정된 결과에 따르면 M-ICP 의 환경에서 공간상에 분포하는 전자의 온도는 ICP 대비 최대 2eV 이상 높았다.

그러나 그림 3.3.27 에 나타나 있는 바와 같이 substrate 근처 (Substrate 로부터 0.8cm 위에서 측정) 에서는 ICP 대비 M-ICP 에서의 전자 온도 증가율이 그리 높지 않다. 오히려 substrate 중심에서의 magnetic flux density 가 19Gauss 로 증가할 때까지는 전자 온도의 큰 변화가 없어 보인다. 이는 그림 3.3.26 을 보

왔을 때 R-wave 의해  $B_z$  field 가 process chamber 내부로 깊이 침투하더라도 substrate 근처까지는 도달하지 못했기 때문인 것으로 보인다. 즉, substrate 근처에서는 R-wave 에 의한 electron heating 이 거의 일어나지 않기 때문에 M-ICP 의 전자 온도가 ICP 와 유사한 것으로 판단된다. M-ICP 의 EEPF (Electron Energy Probability Function) 를 측정한 기존의 연구 결과에서도 이 같은 전자 온도 특성이 확인된 바 있다[44][45]. 그림 3.3.28[45] 을 보면 neutral gas pressure 가 수 mTorr 정도로 낮을 때 ICP 의 EEPF 는 nonlocal electron kinetic 으로 인해 bi-Maxwellian 분포를 이루는데[46], ECR 조건을 만족하는 자기장에 도달하면 low-energy 의 heating 이 효과적으로 일어나면서 low-energy group 이 사라지기도 하지만 그 이상의 세기를 가지는, 즉 ECR 조건을 만족하지 않는 자기장 하에서는 low-energy group 이 재형성되고 있으며 low-energy group 과 high-energy group 의 전자 온도가 ICP 의 경우와 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 다만 본 연구에서 구성한 M-ICP 의 경우 ECR 조건을 만족하지 않는 자기장 뿐만 아니라 ECR 조건을 만족하는 자기장 근처 (8Gauss) 에서도 ICP 와 전자 온도가 비슷하여 뚜렷한 ECR 효과를 관찰하지 못했는데 그 이유에 대해서는 4.2.3 절에서 설명하도록 하겠다.

한편 substrate 중심에 가해진 magnetic flux density 가 22Gauss 나 25Gauss 정도로 비교적 클 경우 M-ICP 의 전자 온도는 ICP 대비 다소 증가하는데 이는 그림 3.3.26 에 나온 바와 같이 substrate 중심에 가해진 magnetic flux density 가 22Gauss 일 때  $B_z$  field 가 substrate 바로 위까지 침투하여 substrate 근처에서도 electron heating 이 활발하게 일어났기 때문인 것으로 생각된다.

정리하면, R-wave 전파에 의한 process chamber 내부로의  $B_z$  field 침투 및 electron heating 으로 M-ICP 의 전자 온도가 ICP 대비 높았으며 plasma confinement 효과에 의해 플라즈마 밀도는 ICP 대비 최대 10배 정도 향상되었다.

식각의 관점에서 생각해 보면, 전자 온도가 증가할 경우 식각 가스 내 parent molecule로부터 식각에 필요한 radical 이 많이 해리 (dissociation) 되기 때문에 식각 속도가 증가할 수 있지만 전자 온도가 지나치게 높을 경우, mask 상단부의 electron charging 으로 인한 ion deflection 으로 profile 이 왜곡되는 문제가 발생할 수 있다. 그러나 본 실험에서 관찰한 바에 따르면 인가한 자기장의 세기가 지나치게 크지 않을 경우 R-wave 전파로 인해 공간에 분포하는 전자의 온도는 증가하여 식각 속도가 개선되는 효과를 기대할 수 있으면서도 식각이 발생하는 substrate 근처의 전자 온도는 ICP 와 비슷하여 profile 왜곡은 최소화할 수 있을 것으로 보인다. 또한 그림 3.3.29 을 보았을 때 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도가 자기장을 인가함으로 인해 향상되기 때문에 대면적 공정의 관점에서 고려했을 때 ICP 보다 M-ICP case 7 이 식각에 훨씬 유리한 환경을 조성할 수 있다.

2 장에서도 설명한 바 있지만 VHF CCP 의 경우 전극에 수 십 ~ 수 백 MHz 에 이르는 높은 주파수를 인가함으로 인해 substrate 부근에 standing wave 가 형성되기 때문에 플라즈마 밀도는 높일 수 있어도 플라즈마 밀도의 균일도를 제어하는데 많은 어려움이 따른다. 또한 MERIE 장치는  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift 로 인해 plasma 가 매우 불균일하며 helicon plasma etcher 나 ECR plasma etcher 의 경우 plasma 의 발생 면적에 비례하여 긴 확산 거리가 필요하기 때문에 대면적 공정에 적용하기 어렵다. 따라서 자기장의 공간 분포를 최적화하는 비교적 간단한 방법으로 플라즈마 밀도의 균일도를 제어할 수 있다는 점은 M-ICP 가 가지는 가장 큰 장점 중의 하나가 될 수 있다.



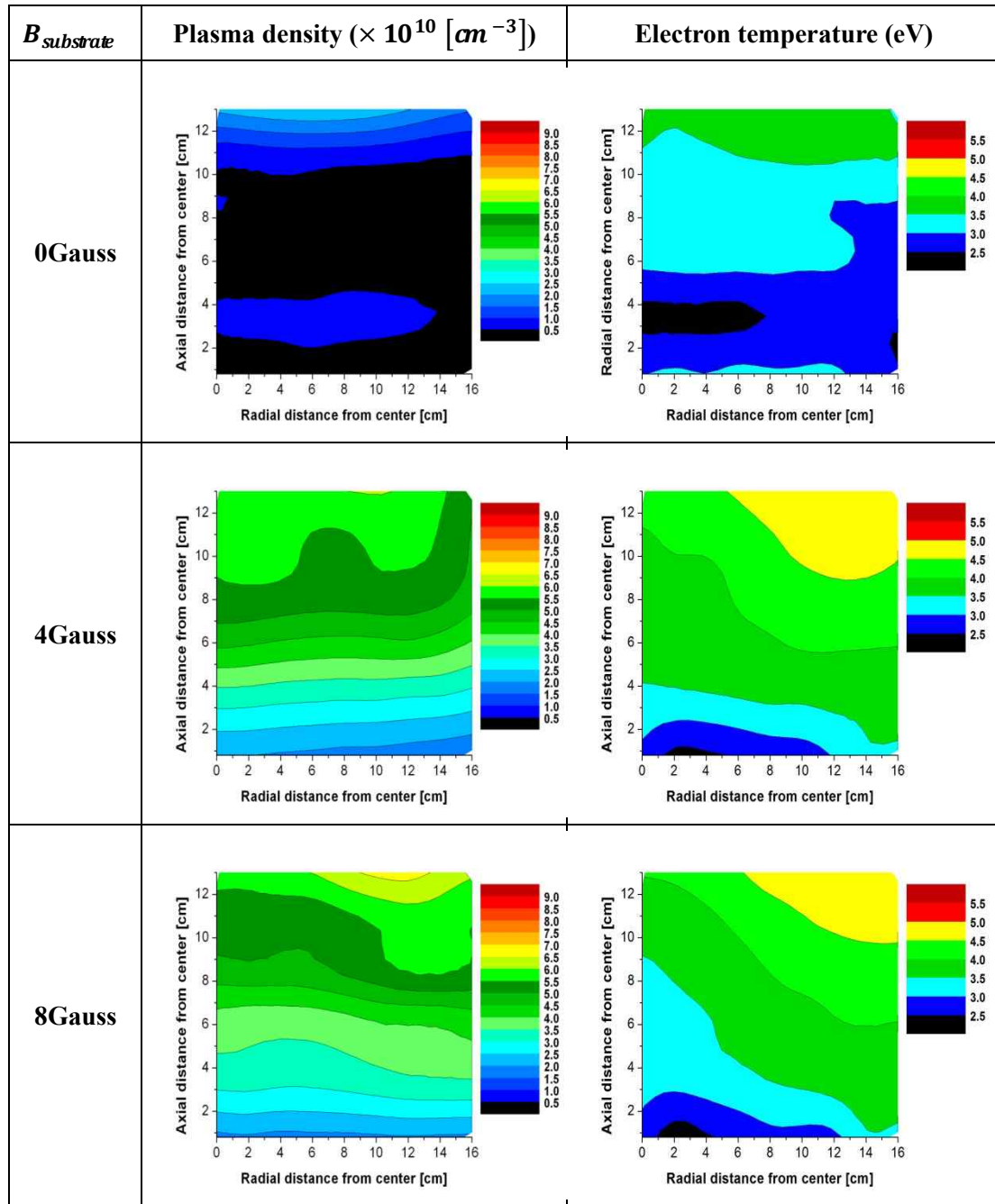


그림 3.3.14 플라스마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

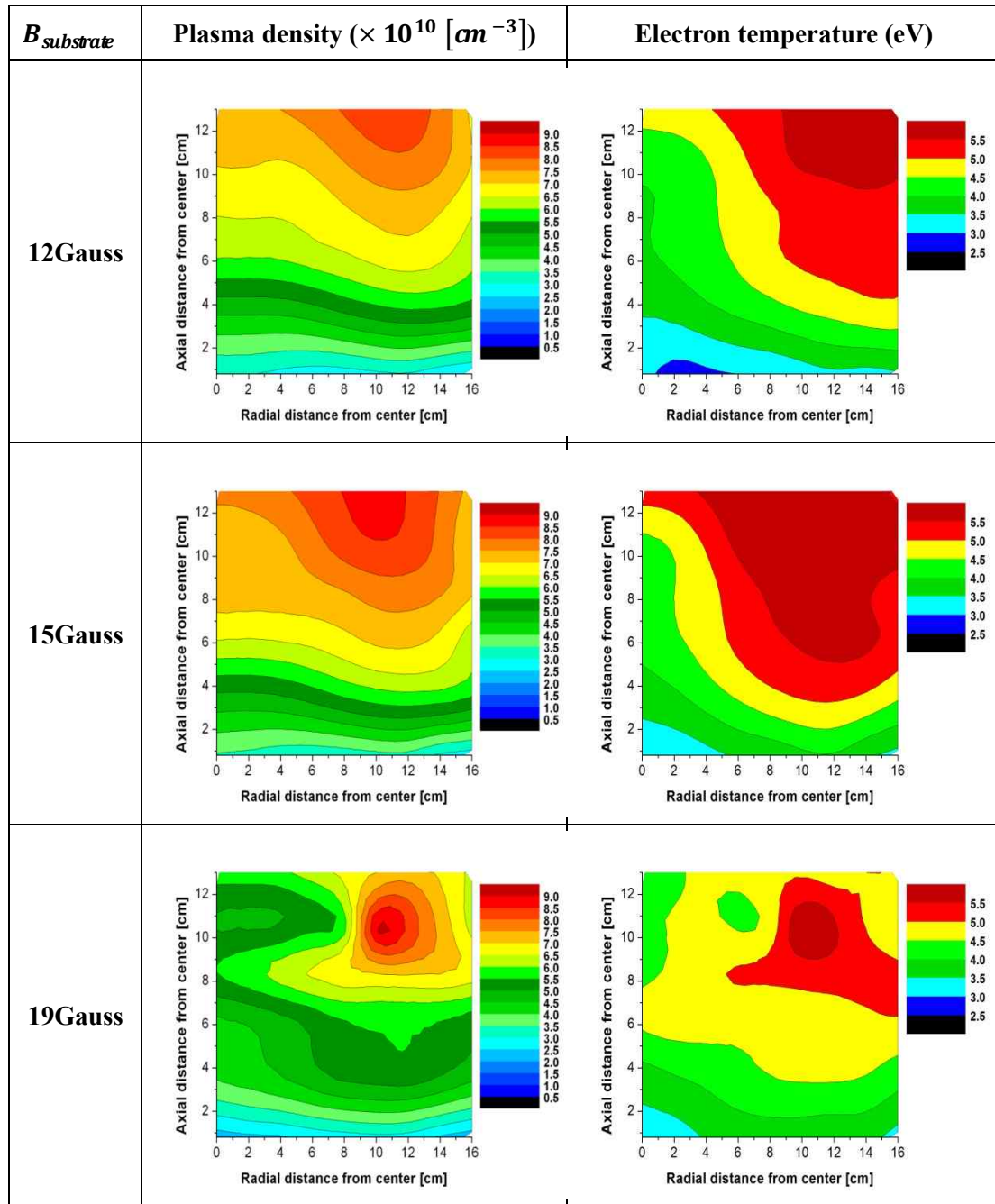


그림 3.3.15 플라스마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

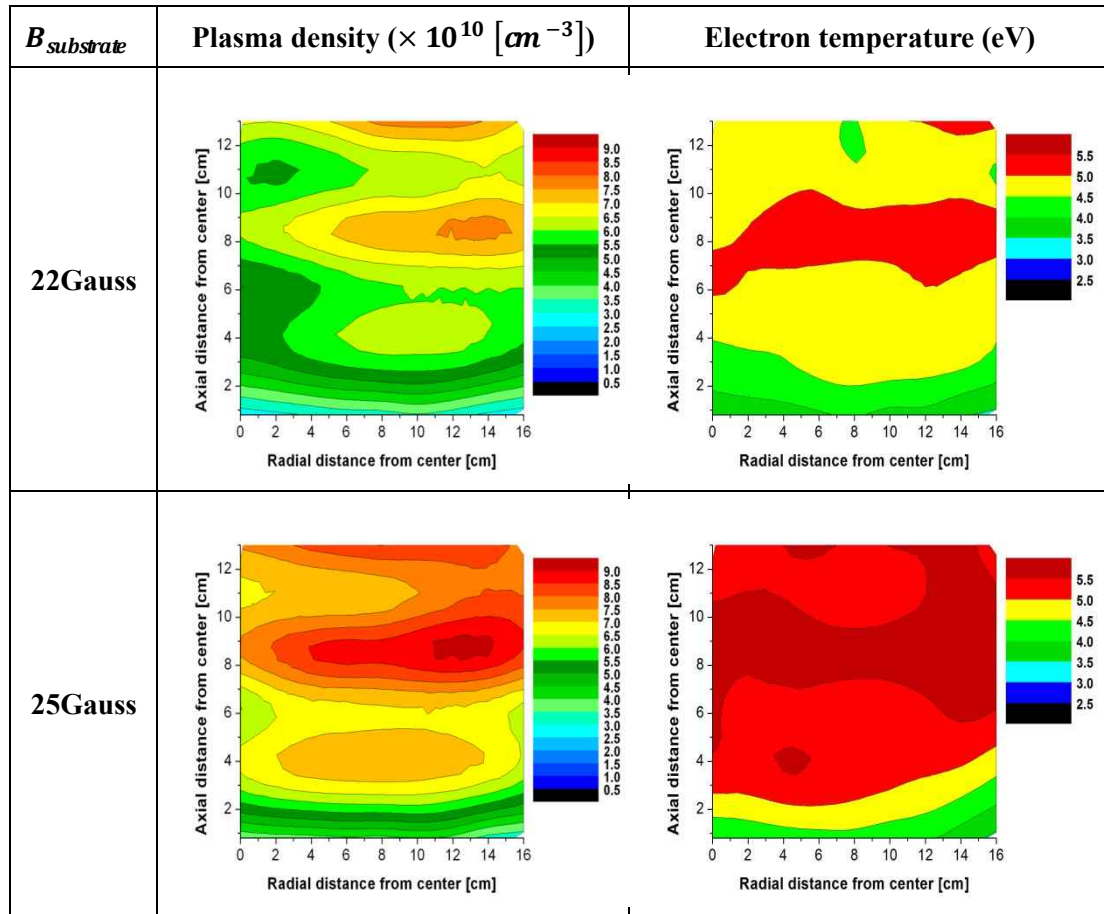


그림 3.3.16 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1mTorr, 22 / 25Gauss)

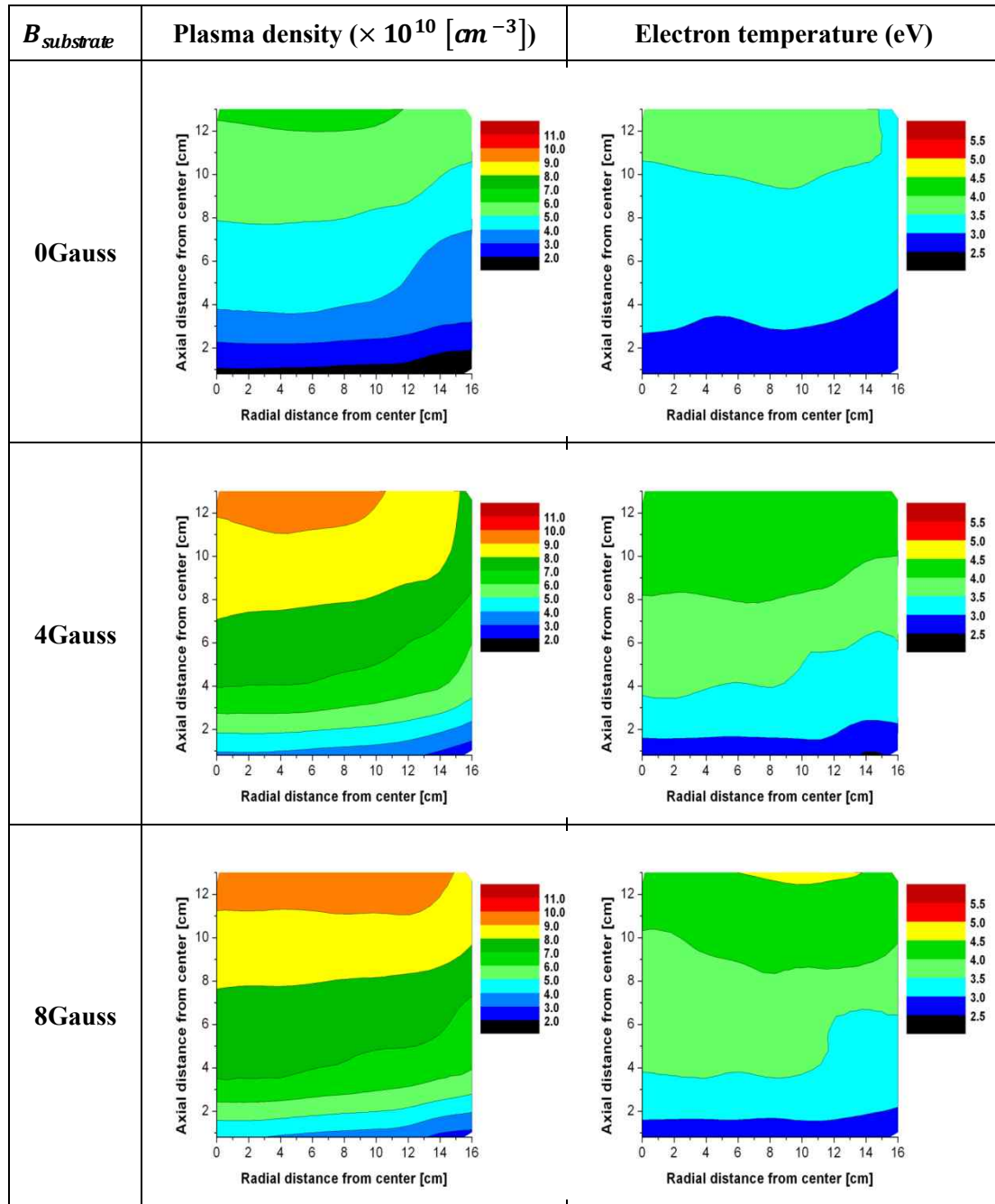


그림 3.3.17 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

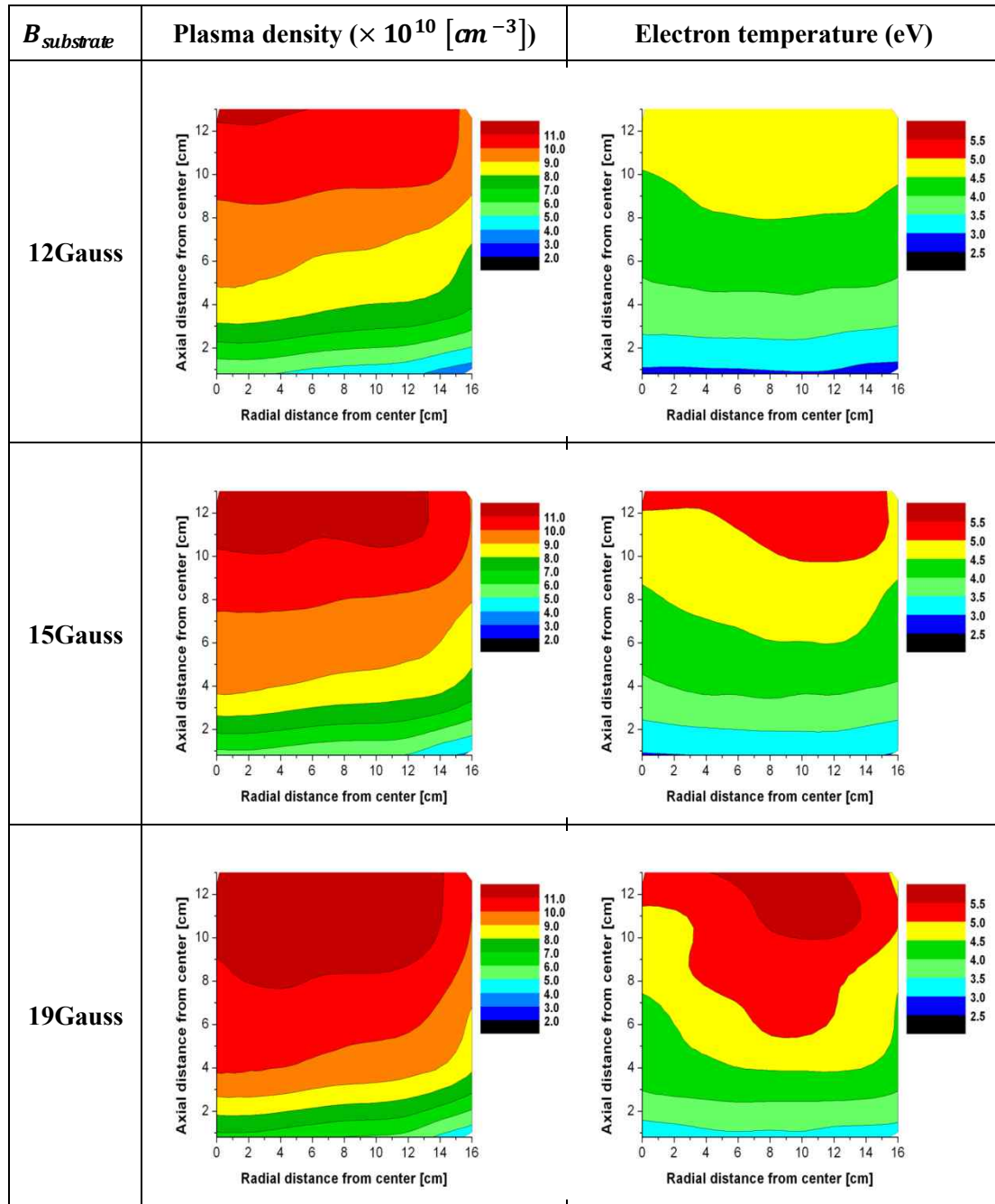


그림 3.3.18 플라스마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

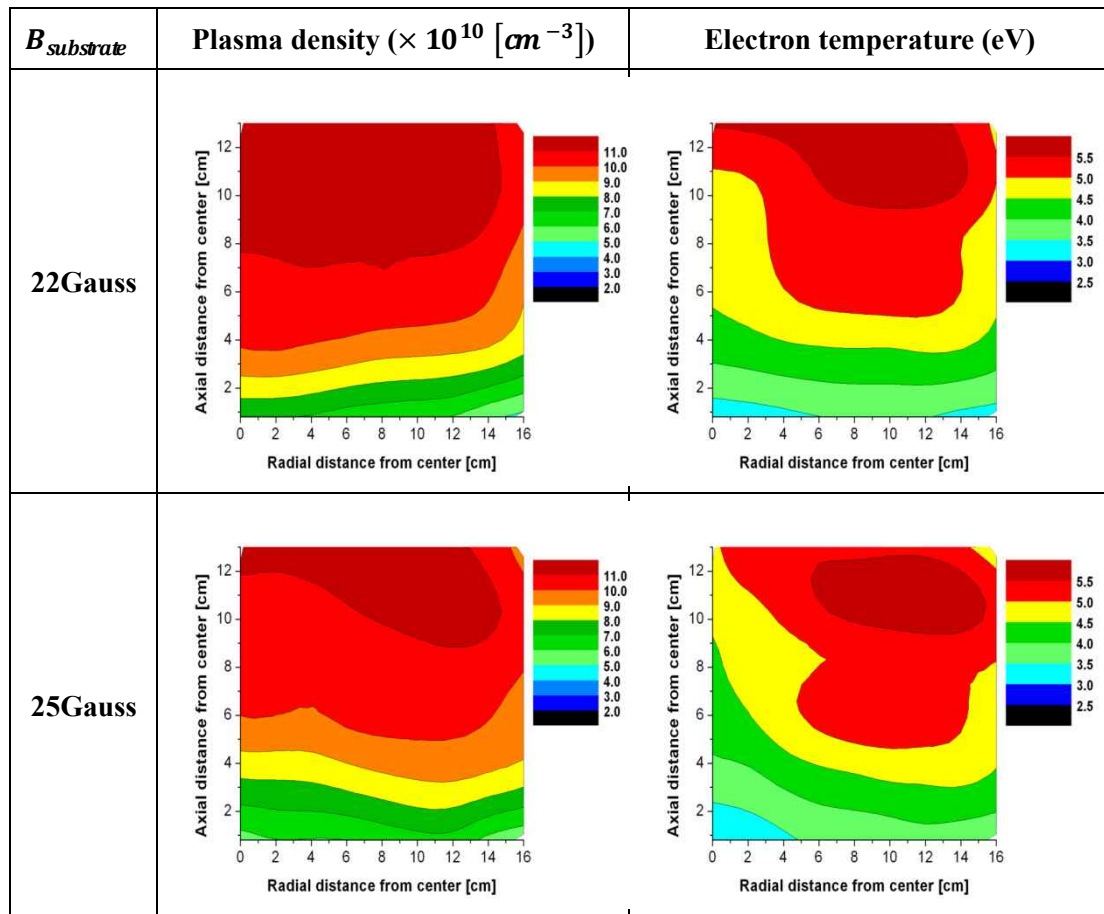


그림 3.3.19 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (5mTorr, 22 / 25Gauss)



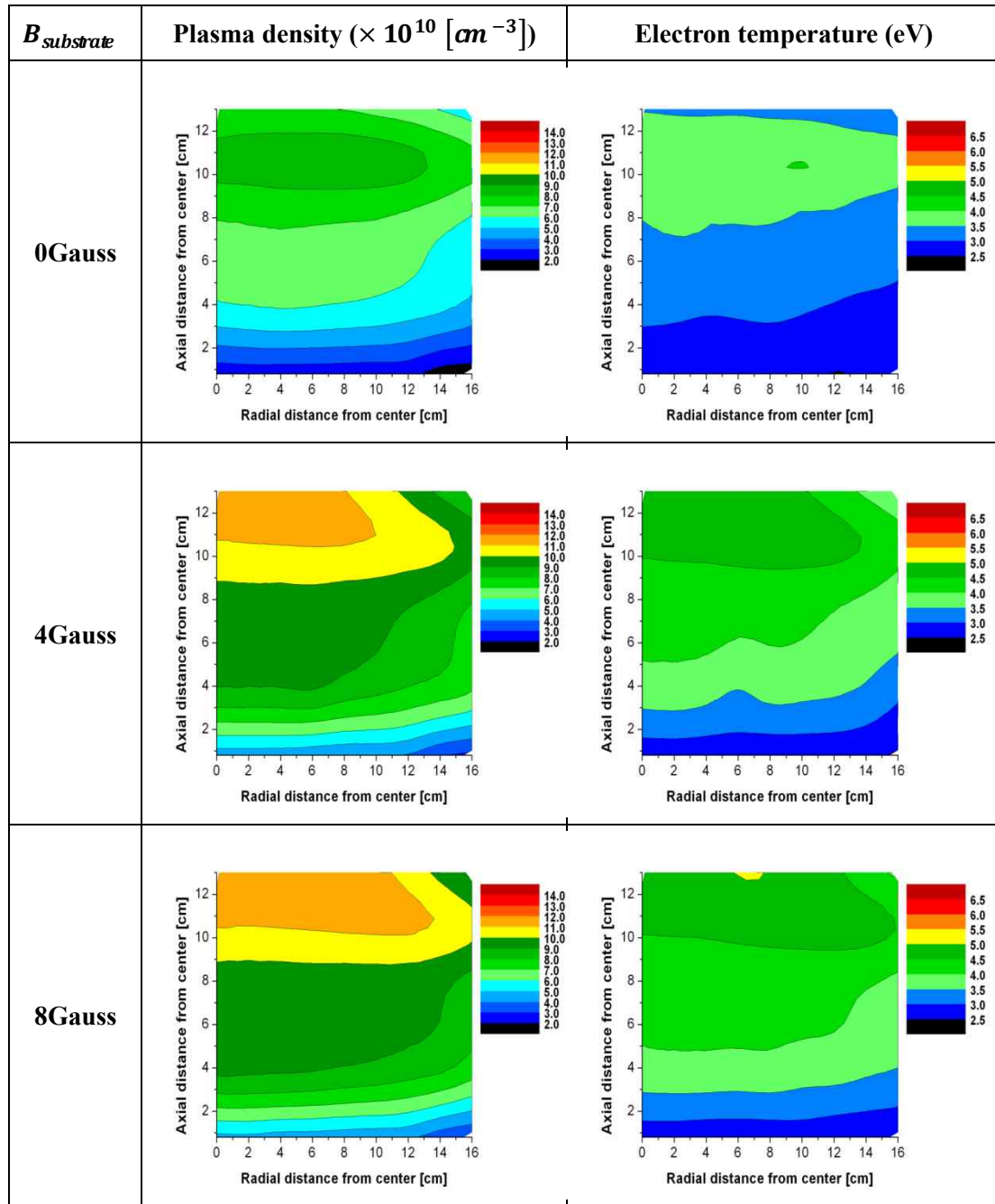


그림 3.3.20 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

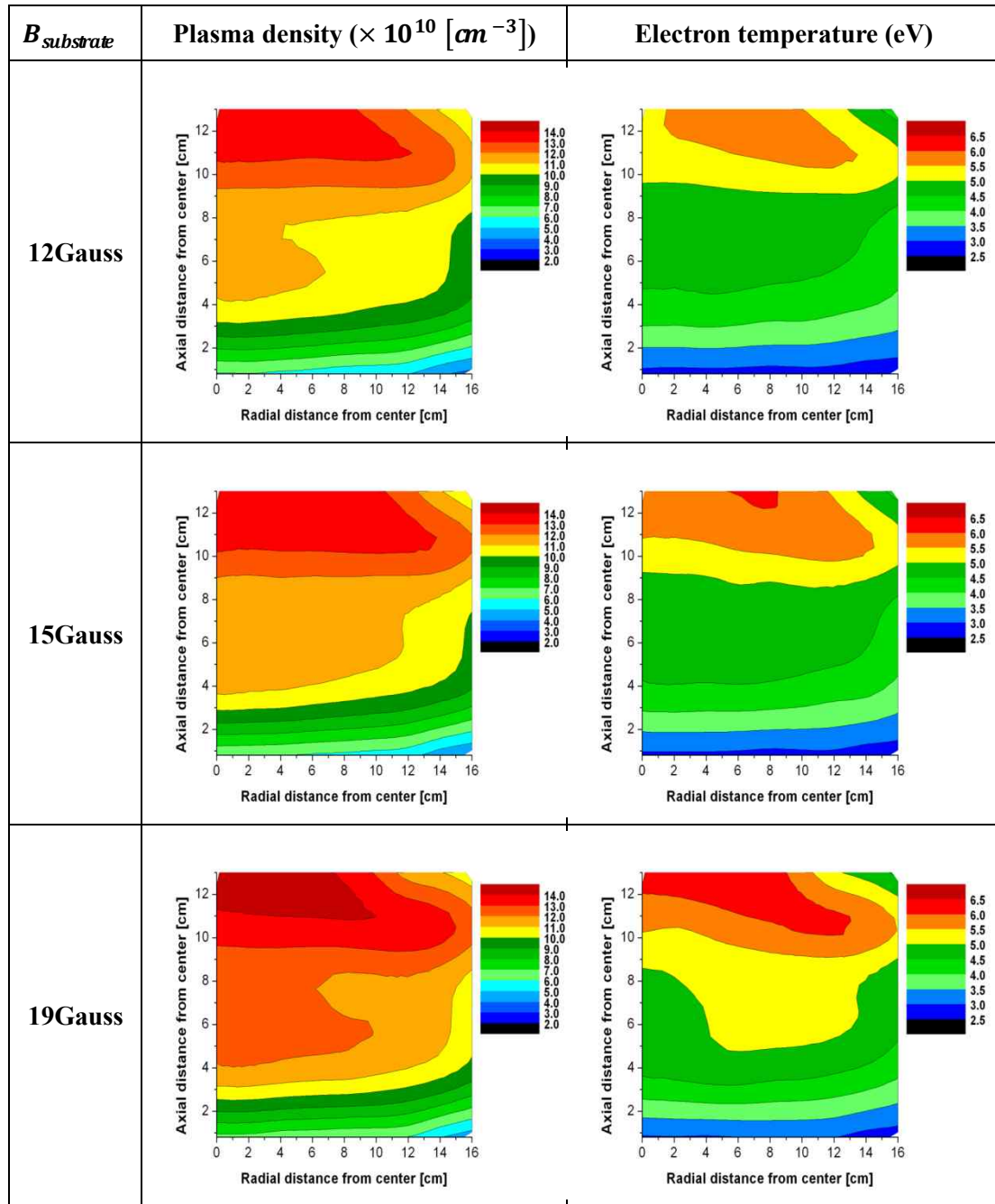


그림 3.3.21 플라스마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)



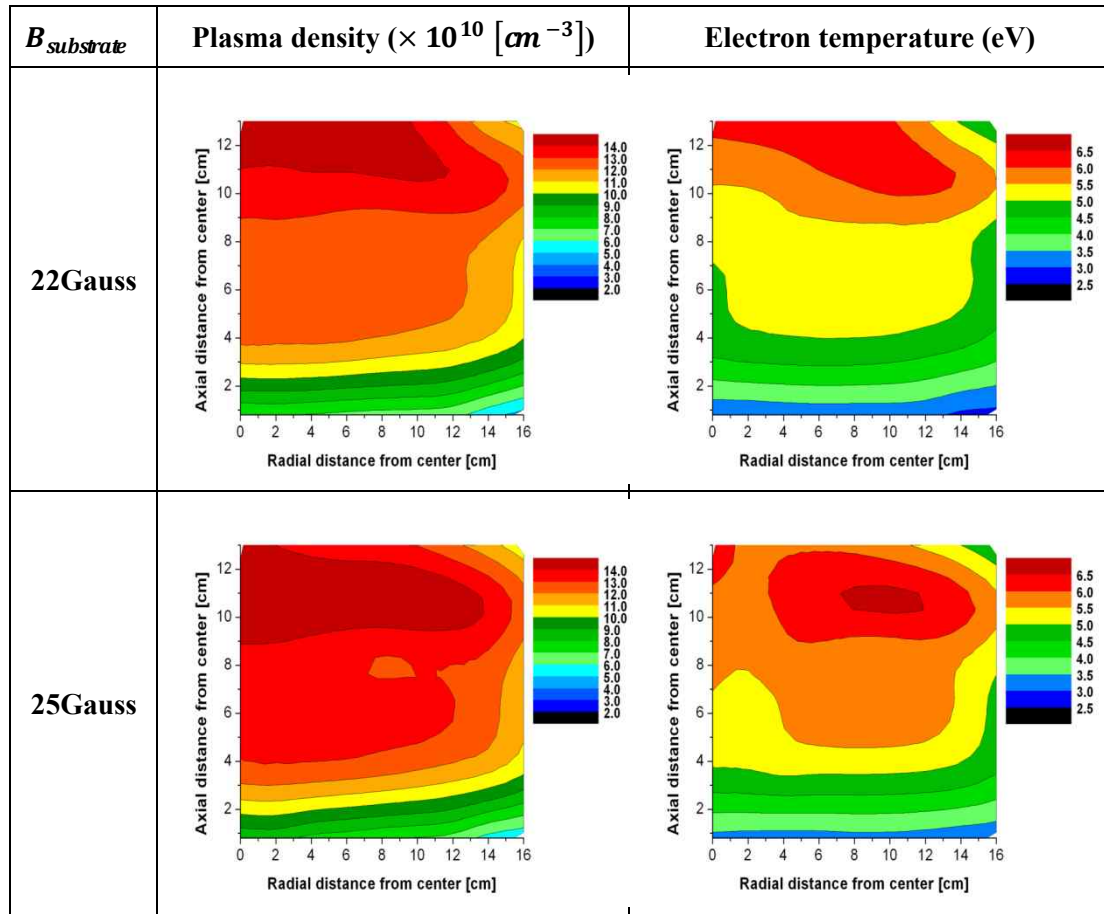


그림 3.3.22 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (10mTorr, 22 / 25Gauss)

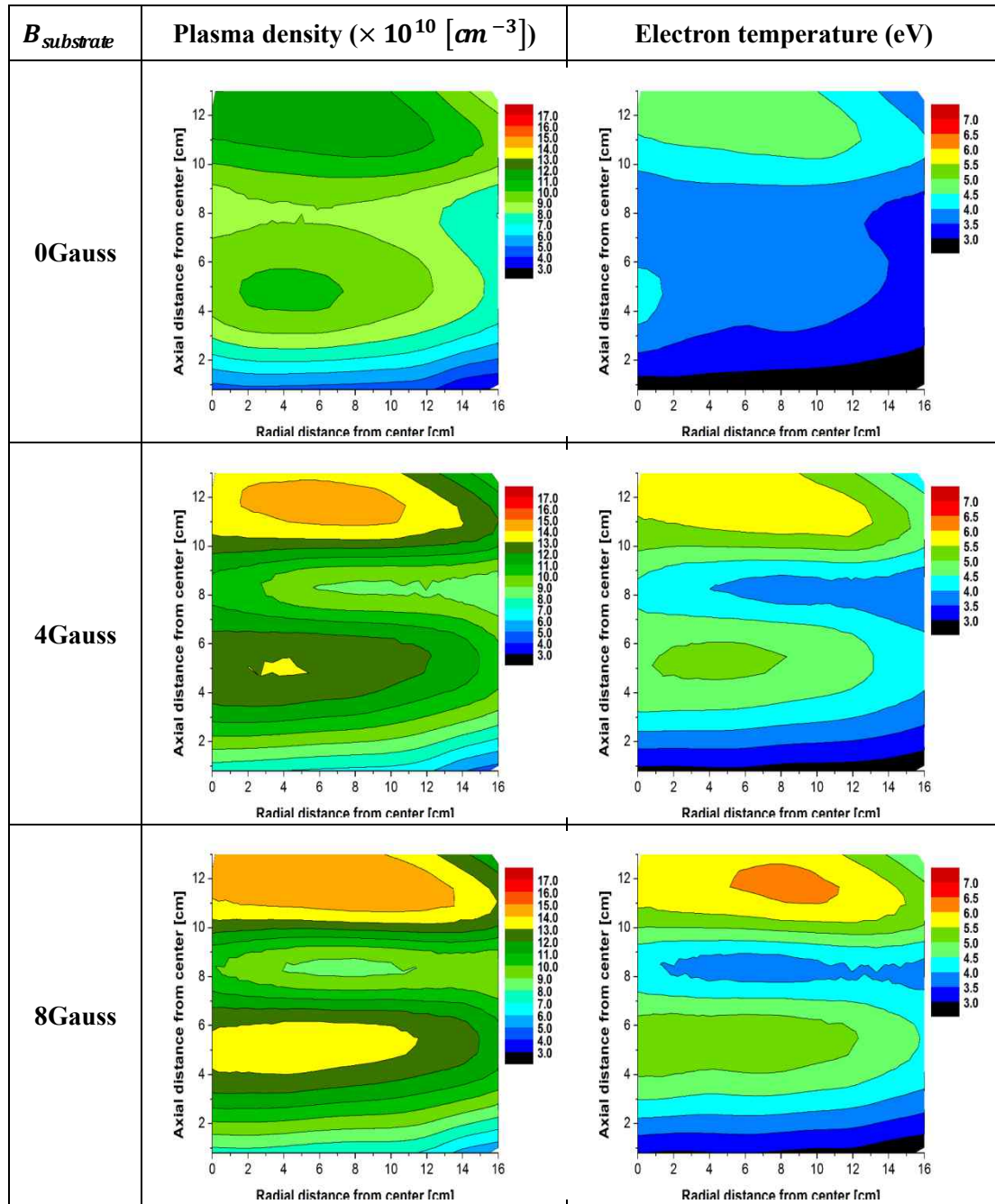


그림 3.3.23 플라스마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 0 / 4 / 8Gauss)

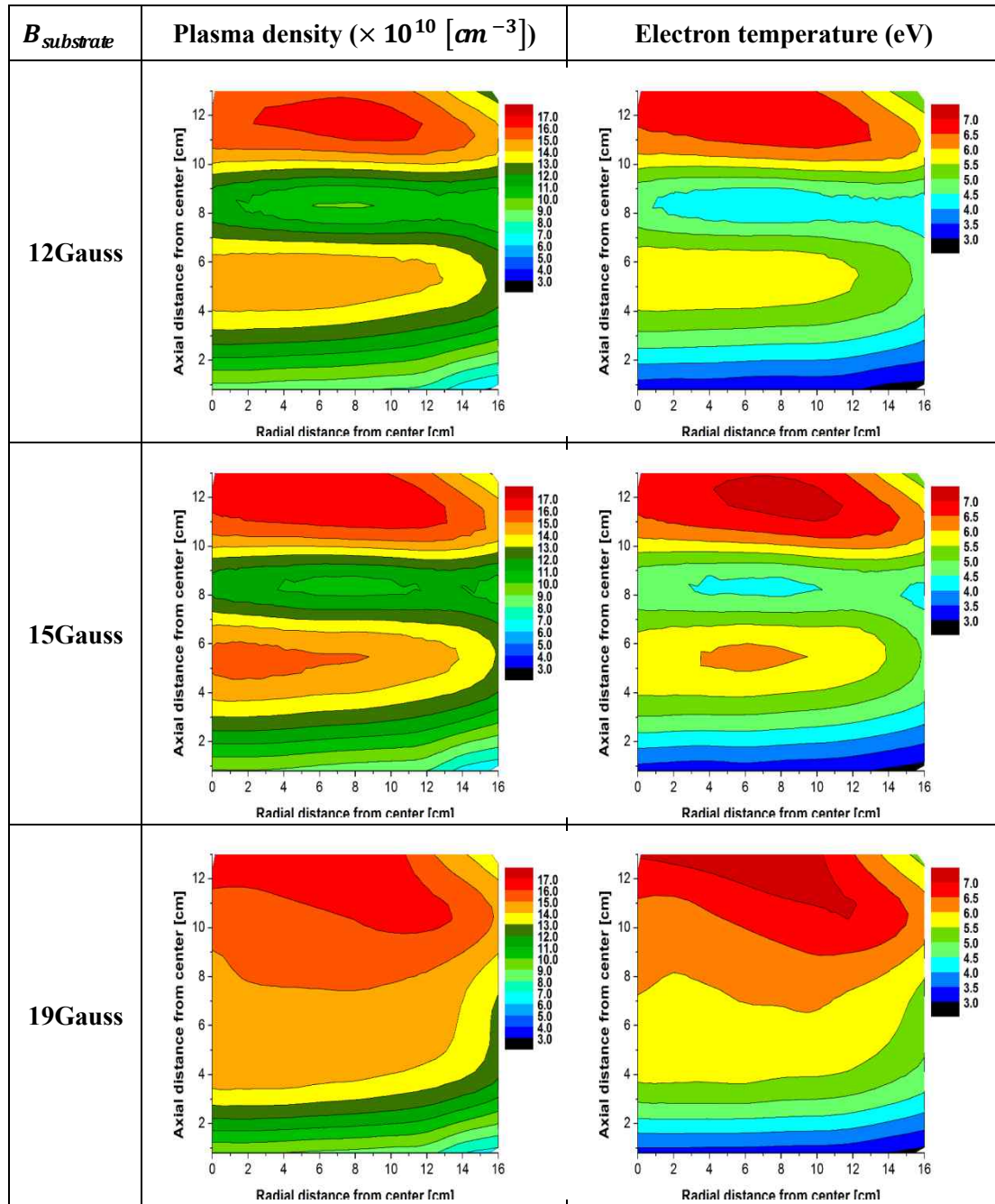


그림 3.3.24 플라스마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 12 / 15 / 19Gauss)

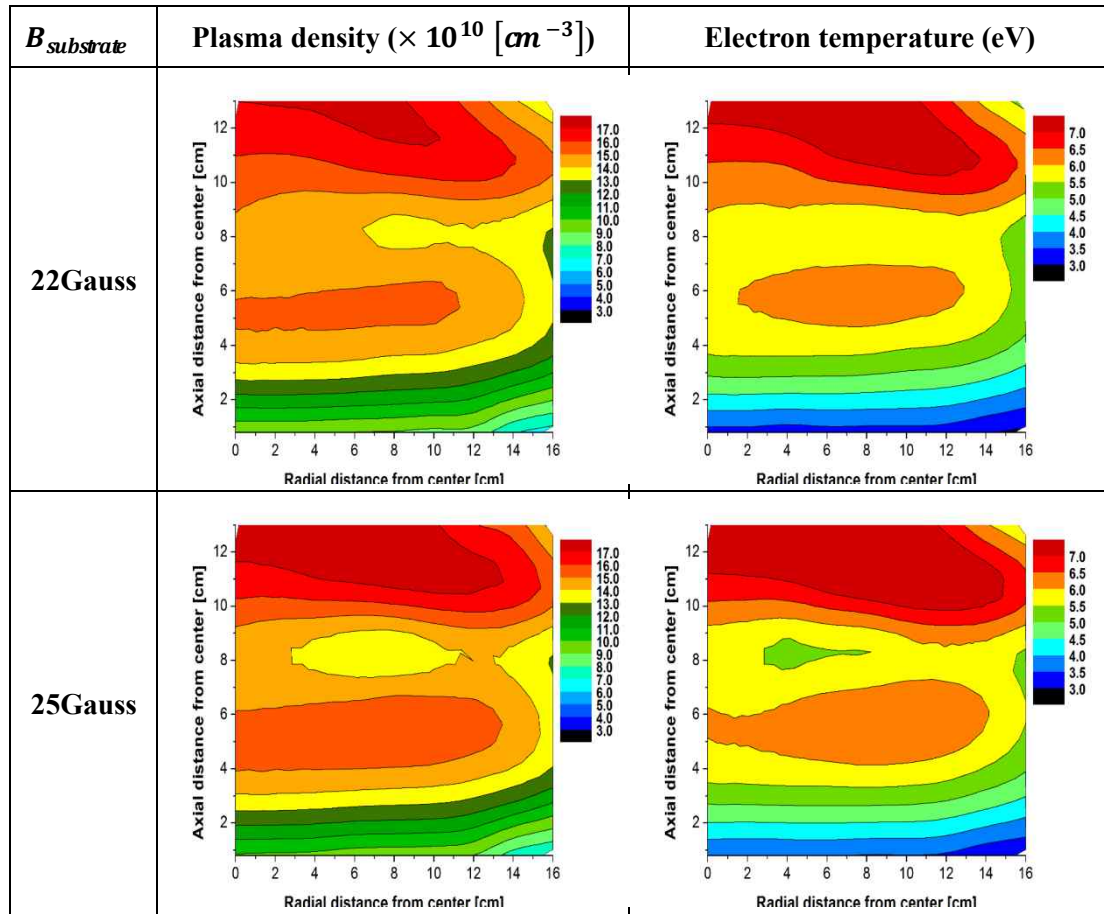
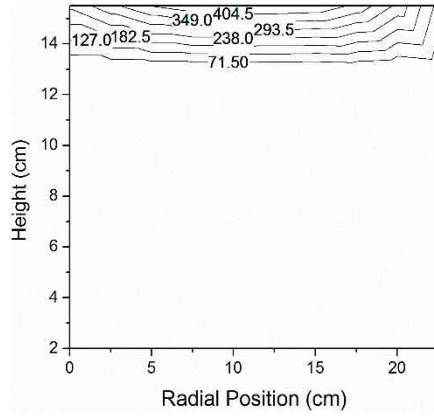
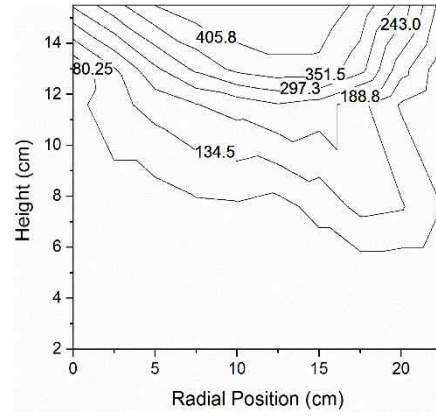


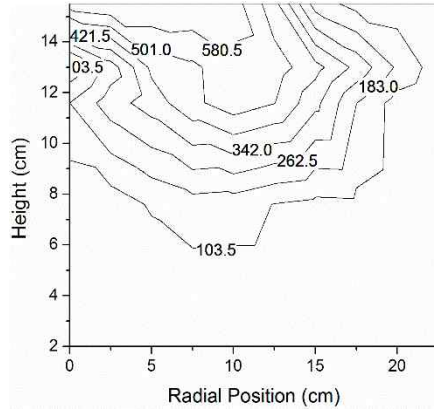
그림 3.3.25 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (20mTorr, 22 / 25Gauss)



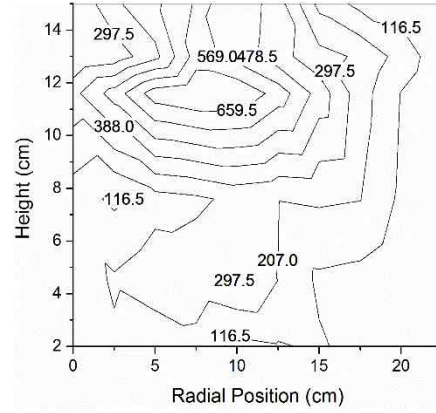
(a) 0Gauss



(b) 8Gauss



(c) 15Gauss



(d) 22Gauss

그림 3.3.26 Time-varying  $B_z$  field (10mTorr)[33]

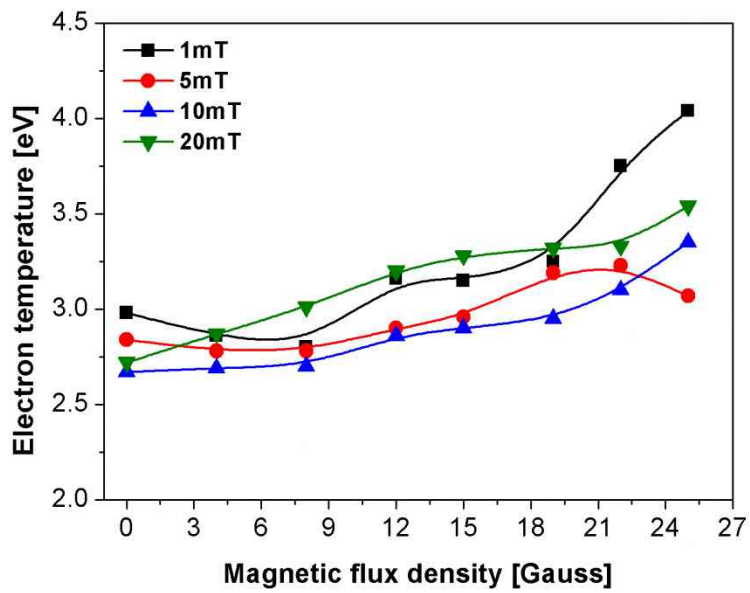
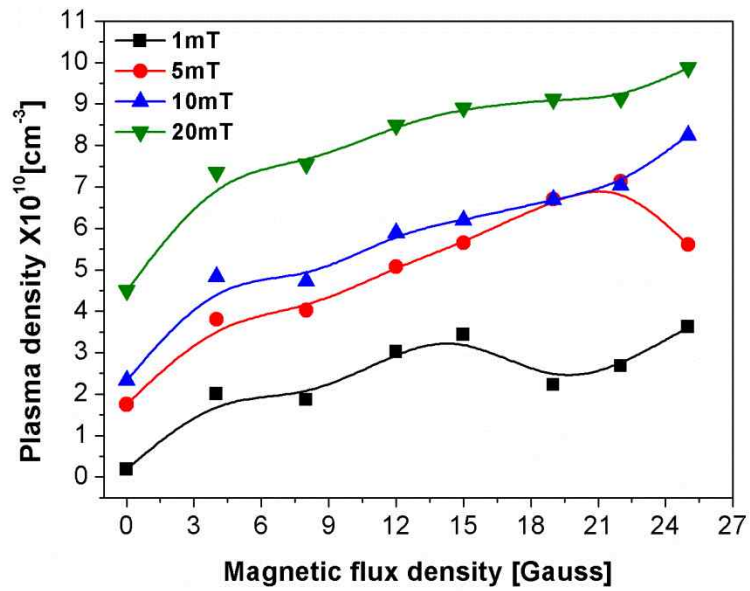


그림 3.3.27 Substrate 중심에서 플라즈마 밀도 및 전자 온도 (1, 5, 10, 20mTorr)

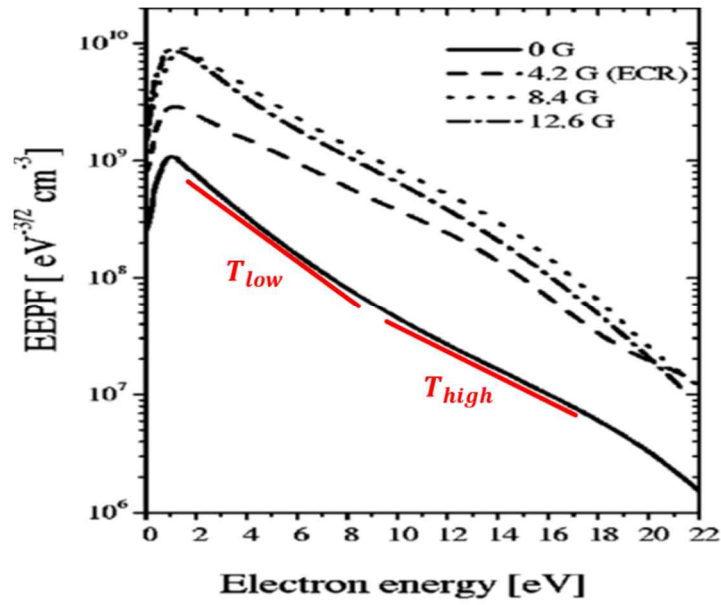


그림 3.3.28 ICP 와 M-ICP 의 EEDF (Ar plasma, 2mTorr, 150W)[45]

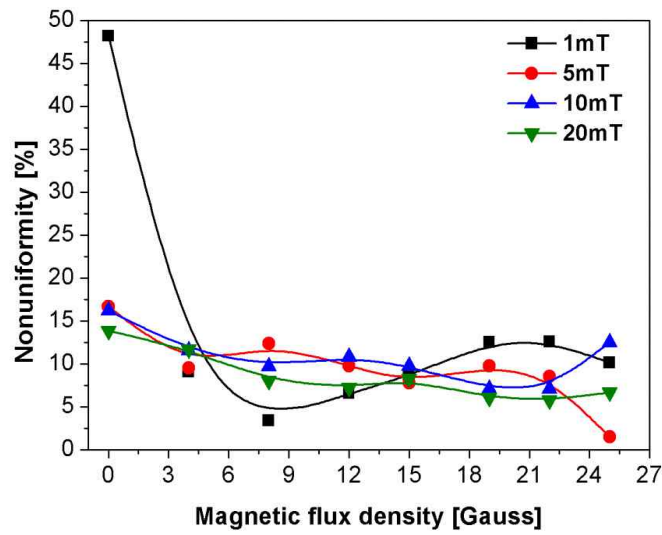


그림 3.3.29 플라즈마 밀도의 반경 방향 균일도 (1, 5, 10, 20mtorr)



### 3.4 요약 및 향후 과제

제 3장에서는 본 연구에서 사용된 M-ICP 장치의 구성 과정 및 구성이 완료된 장치의 기본적인 플라즈마 방전 특성에 대하여 살펴보았다. M-ICP 장치 구성을 위해 먼저 시스템의 구조를 고려하여 전자석이 배치될 곳을 결정한 뒤 이론적인 계산식 및 소프트웨어를 활용하여 bobbin 의 반경, coil 의 감김 횟수 등을 설계하였다. 그리고 설계된 사양대로 전자석을 제작한 후 Gaussmeter 를 활용하여 process chamber 내부의 자기장의 공간적인 분포를 측정한 결과가 시뮬레이션을 통해 예측한 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

한편, 대면적 공정의 관점에서 건식 식각 환경에 최적화된 자기장 분포를 찾아내기 위하여 시스템에 설치한 복수의 전자석에 다양한 세기의 전류를 시계 방향 혹은 반시계 방향으로 인가하여 여러 가지의 자기장 분포를 구성해 보았다. 그 결과 substrate 중심으로부터 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가 혹은 감소하거나 일정하게 유지되는 7가지의 경우를 찾아낼 수 있었다. 이론적으로 살펴본다면 플라즈마의 flute instability 를 방지하기 위하여 또는 R-wave 가 process chamber 내부로 전파하여 electron 에 에너지가 공급될 수 있도록 하기 위하여 반경 방향 혹은 수직축 방향으로 magnetic flux density 가 증가하는 것이 바람직해 보이는데 이를 입증하기 위하여 위 7 가지 경우에 대해 DLP 를 활용하여 substrate 중심으로부터 반경 방향으로 플라즈마 밀도 및 전자 온도 등을 측정해 보았다. 그 결과, 반경 방향으로 magnetic flux density 가 증가할 때 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도가 ICP 대비 뛰어나다는 사실을 확인하였고 축 방향으로 magnetic flux density 가 증가할 때 플라즈마 밀도가 크게 향상됨을 알 수 있었다. 이는 축 방향으로 자기장의 세기가 증가할 때 magnetic mirroring 혹은 magnetic trap 으로 인해 플라즈마가 효과



적으로 가두어질 수 있기 때문인 것으로 보인다.

마지막으로, 플라스마 밀도 및 밀도의 균일도 관점에서 가장 최적화된 조건을 바탕으로, substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density 를 0~25Gauss 정도로 다양하게 변화시켰을 때 나타나는 process chamber 내부의 플라스마 밀도 및 전자 온도의 2차원적인 공간 분포를 자세하게 측정해 보았다. M-ICP 의 경우 ICP 대비 공간에 분포하는 전자의 온도가 높았는데 이는 자기장의 인가를 통해 process chamber 내부로 전파한 R-wave 에 의한 electron heating 때문인 것으로 보인다. 그러나 식각이 이루어지는 substrate 근처에서는 M-ICP 의 전자 온도가 ICP 의 전자 온도와 거의 비슷하거나 약간 높은 수준을 보였다. 따라서 M-ICP 의 경우 전자 온도의 증가로 인해 식각 속도가 향상되는 효과를 기대할 수 있으면서도 mask 의 electron charging 에 의한 profile 왜곡은 최소화할 수 있다. 또한 substrate 근처에서의 플라스마 밀도는 M-ICP 가 ICP 대비 최대 10배 이상 높았으며 플라스마 밀도의 균일도도 M-ICP 가 전반적으로 우수했다. 이는 대면적 공정의 관점에서 기술적인 한계를 보여주는 다른 식각 장치와 달리 M-ICP 장치의 경우 자기장의 공간 분포를 최적화하는 매우 간단한 방법으로 플라스마 밀도의 균일도를 개선할 수 있음을 보여준다.

다만 플라스마 밀도의 균일도 뿐만 아니라 substrate 중심으로부터 반경 방향에 따른 ion energy 및 ion flux 의 분포, EEPF 나 radical flux 등도 M-ICP 장치의 대면적 공정 적용 가능성을 판단함에 있어서 매우 중요한 인자들이다. 따라서 식각에 기여하는 인자들을 최대한 복합적으로 고려하여 자기장의 공간 분포를 최적화하는 작업이 추가적으로 요구된다.

## 제 4 장 High Aspect Ratio Contact hole 의 식각 특성

제 4 장에서는 제 2, 3 장에 걸쳐 살펴본 M-ICP 장치에서 산화물 기반의 High Aspect Ratio Contact hole (HARC) 을 식각했을 때 나타날 수 있는 여러 가지 현상들을 ICP 의 경우와 비교하여, 그리고 bias frequency, magnetic flux density, neutral gas pressure, bias power, source power, gas ratio 등의 다양한 process parameter 와 연관지어 살펴보려고 한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 M-ICP 장치는 ICP 장치 대비 플라즈마 밀도가 높고 반경 방향의 플라즈마 밀도 균일도가 우수하여 산업적인 측면에서 본다면 대면적 wafer 공정이 가능함과 동시에 생산성이 향상될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 식각 장치를 통하여 etch rate 나 생산성 뿐만 아니라 식각 하고자 하는 물질의 profile 에 대한 제어도 수월하게 이루어질 수 있어야 하는데, 이는 식각 공정을 진행하는 과정에서 Loading effect, RIE Lag, Notch, Bowing, Micro trench, faceting, undercut 등의 다양한 현상들로 인해 식각물의 profile 에 damage 가 발생할 수 있기 때문이다[47].

4 장에서는 HARC etching 시 발생할 수 있는 RIE lag (Reactive Ion Etching lag) 혹은 ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) 라고 불리는 현상에 관하여 연구한 결과들을 소개하고자 한다. 이와 관련하여 먼저 4.1 절에서는 RIE lag 라고 불리는 현상의 정의 및 발생 원인과 이에 대한 기존의 연구 결과 등을 종합적으로 살펴보았다. 그리고 4.2 절에서는 ICP 와 M-ICP 장치에서 HARC 를 식각했을 때 발생하는 RIE lag 현상을 다양한 process parameter 와 연관지어 설명하였다.

## 4.1 RIE lag 현상에 대한 이해

### 4.1.1 RIE lag 현상의 정의

반도체 소자 내에는 이용 목적에 따라 다양한 크기의 폭과 깊이를 가지는 pattern 이 존재한다. 건식 식각 공정을 진행하다 보면 식각 하고자 하는 물질은 동일하더라도 pattern 의 식각 면적이나 폭에 따라 etch rate 가 달라지는 현상을 관찰할 수 있는데 이를 loading effect 라고 부르며[18] 이를 다시 macroscopic loading effect, microscopic loading effect 그리고 RIE lag 등으로 분류할 수 있다.

Macroscopic loading Effect 는 etcher 에 투입한 wafer 의 개수가 증가하거나 하나의 wafer 상에서 식각할 면적이 증가함에 따라서 etch rate 가 감소하는 현상을 의미한다. 그림 4.1.1[48]은 etcher 에 투입한 wafer 의 개수가 늘어남에 따라 etch rate 가 감소하는 전형적인 결과를 보여주고 있는데 이러한 macroscopic loading effect 가 발생하는 주된 이유는 식각에 기여하는 etchant 의 양이 한정되어 있기 때문이다. 이러한 현상을 억제하기 위해 실제로는 투입된 wafer 의 개수를 일정하게 유지하기도 하지만 현재는 여러 장의 wafer 를 동시에 투입하는 batch type etcher 는 사용하지 않아 이러한 문제가 거의 발생하지 않는다고 한다 [49].

Microscopic loading effect 는 하나의 wafer 상에서 조밀하게 형성된 pattern 이 그렇지 않은 pattern 에 비하여 etch rate 가 낮은 현상을 의미하며 그림 4.1.2 에 그 개념이 잘 표현되어 있다[18]. 이러한 현상이 나타나는 이유는 pattern 이 조밀한 영역에서의 etchant 소모량이 그렇지 않은 영역 대비 많아 결과적으로 잔류하는 etchant 의 양이 상대적으로 적기 때문이다. 특히, microscopic loading effect 는 gas pressure 가 높아 etchant 의 이동이 어려운 경우 발생하기 쉽다.

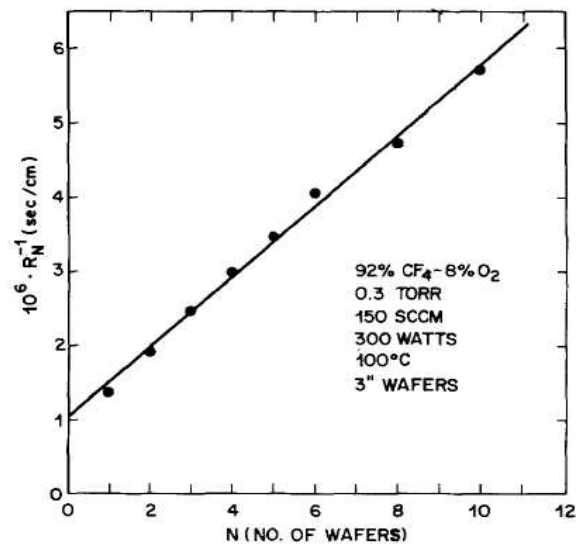


그림 4.1.1 Etcher 에 투입한 wafer 개수에 따른 역 etching 률[48]

Microscopic loading 은 식 4.1.1과 같이 정량적으로 표현될 수 있다[50].

$$Microloading(\%) = 100 - \frac{\text{high pattern density etching rate}}{\text{low pattern density etch rate}} \times 100 \quad (4.1.1)$$

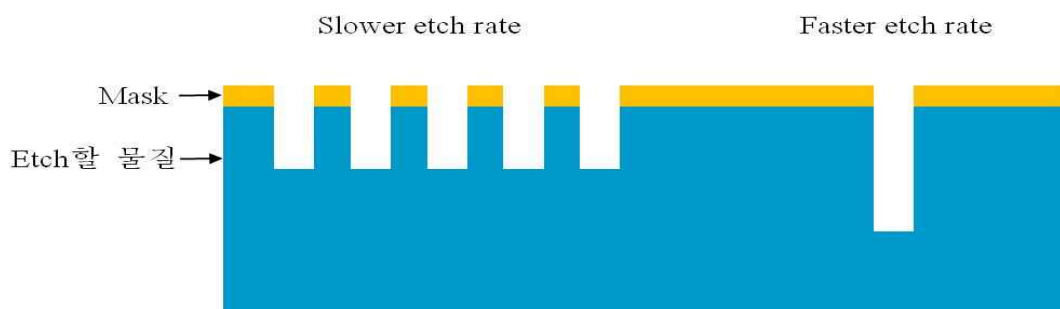


그림4.1.2 Microscopic loading effect 의 개념도 [18]

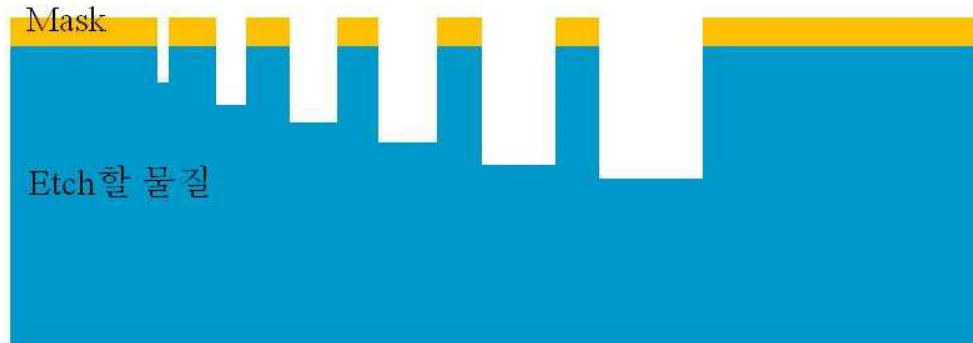


그림 4.1.3 RIE Lag 의 개념도[18]

한편, RIE lag 혹은 ARDE 는 pattern 의 aspect ratio (pattern 의 폭에 대한 깊이의 비) 가 증가함에 따라서 etch rate 가 감소하는 현상을 의미하며 그림 4.1.3 에 그 개념이 잘 표현되어 있다. (또한 RIE lag 는 aspect ratio 가 동일한 pattern 이더라도 etch time 혹은 etch depth 가 증가함에 따라 etch rate 이 감소하는 현상을 의미하기도 한다.) 또한 이와는 반대로 오히려 aspect ratio 가 증가함에 따라 etch rate 가 증가하는 경우가 있는데 이를 inverse RIE lag 라고 부른다. 이는 다량의 polymer 를 형성하는 식각 가스로 HARC 를 식각할 때 관찰될 수 있는 현상이다[51][52]. 앞서 반도체 소자 내에는 다양한 크기의 폭과 깊이를 가지는 pattern 이 존재한다고 하였는데, 반도체 회사에서 주력으로 개발하고 있는 logic device 의 경우 이러한 pattern 들을 동시에 식각해야 하는 경우가 많기 때문에 RIE lag 혹은 ARDE 라고 불리는 현상에 대해 정확하게 이해하려는 노력은 이전부터 꾸준히 계속되어 왔다. 그 결과 ion, radical (혹은 neutral), electron 뿐만 아니라 식각 부산물까지 연관지어 RIE lag 를 설명하는 mechanism 이 매우 다양하게 발표되었다[53]-[56]. 이에 4.1.2 절에서는 RIE lag 를 설명하는 가장 대표적인 4가지 mechanism 인 Ion Shadowing [53], Neutral Shadowing [54], Knudsen Neutral Transport [55], Differential Charging [56] 등에 대해 자세히 살펴보려고 한다.

#### 4.1.2 RIE lag 현상의 발생 원인

앞서 RIE lag 를 설명하는 mechanism 은 대표적으로 4 가지가 있다고 했는데 이 중 Ion Shadowing [53] 과 Differential Charging [56] mechanism 은 주로 ion 의 움직임 측면에서 접근을 하고 있는 반면 나머지 Neutral shadowing[54] 과 Knudsen Neutral Transport[55] mechanism 은 주로 radical (혹은 neutral) 의 움직임 측면에서 RIE lag 의 현상에 대해 설명하고 있기 때문에 결국 실제 실험에서는 4 가지 mechanism 을 복합적으로 고려해야 할 필요가 있다.

먼저 Ion Shadowing mechanism 의 경우 그림 4.1.4 를 통해 어느 정도 이해가 가능하다[50]. 그림에 나타난 것처럼 electron 이나 radical (혹은 neutral) 은 등방성 운동을 하는 반면 ion 은 비등방성 운동을 하기 때문에 ion 의 angular distribution 이 상대적으로 좁다. 게다가 etch time 이나 etch depth 가 증가함에 따라 바닥면에서 바라본 solid angle 은 점점 좁아지기 때문에 바닥면으로 도달하는 ion 의 양은 감소할 수밖에 없다. 다시 말해 solid angle 이 감소함에 따른 ion shadowing 으로 인해 RIE lag 가 발생한다는 것이 Ion Shadowing mechanism 의 핵심이다[53]. 따라서 임의의 물질에 대한 식각 특성이 주로 ion energy 나 ion flux 에 의해 결정되는 경우 RIE lag 가 발생할 수 있다.

Ion 의 움직임으로 RIE lag 를 설명하는 또다른 이론인 Differential Charging mechanism[56] 은 ion 과 electron 의 surface charging 을 주요 원인으로 보고 있다. Surface charging 은 electron 은 등방성 운동을 하는 반면 ion 은 sheath 에 의한 가속을 받으며 비등방성 운동을 하기 때문에 발생한다. 이 경우, electron 은 주로 pattern 의 상단부나 sidewall 에 축적되는 반면 ion 은 pattern 의 하단부나 바닥면까지 도달한다. 그러므로 그림 4.1.5 와 같이 pattern 상단부와 sidewall 은 음으로 대전되고 pattern 의 하단부와 바닥면은 양으로 대전된다.

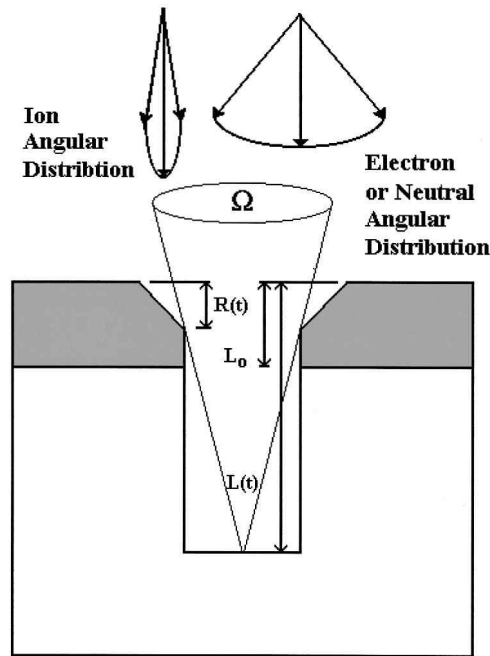


그림 4.1.4 Pattern etching 시 etch time 에 따른 solid angle 의 변화[50]

상기의 현상을 differential charging 이라고 하는데 절연체의 경우 charge relaxation 이 원활하게 이루어지지 않아 ion 과 electron 이 분리된 후 확산 등을 통하여 전기적으로 중성이 되는 것이 매우 어렵다. 식각 물질이 도전체라고 하더라도 mask 가 절연 물질인 경우 역시 위와 같은 현상이 발생할 수 있다. 결과적으로, differential charging 으로 인해 ion 과 electron 이 분리되는 경우 그림 4.1.4 와 같이 local electric field 가 형성되어 ion 이 바닥면으로 도달하기 어려워진다. 이러한 현상은 pattern 의 aspect ratio 가 증가할수록 심화된다. 또한 differential charging 현상에 의해 RIE lag 뿐만 아니라 micro trench (혹은 dove tail) 나 bowing 과 같은 profile 왜곡 현상도 나타날 수 있다[56]. 참고로 이러한 differential charging 을 완화하고 RIE lag 나 profile 왜곡을 최소화하기 위해서는 펄스 플라즈마를 적용하는 것이 효과적일 수 있다[49].

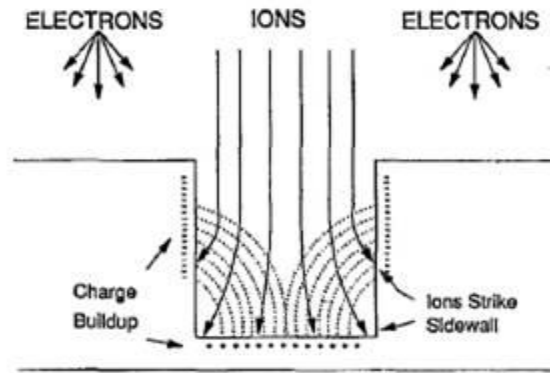


그림 4.1.5 Pattern etching 시 발생하는 Surface Charging [56]

한편, radical (혹은 neutral) 의 움직임으로 RIE lag 현상을 설명하고 있는 Neutral shadowing[54] 과 Knudsen Transport[55] mechanism 은 서로 매우 밀접하게 연관되어 있다. 두 mechanism 은 모두 식각 반응이 ion 과는 관계 없이 오로지 neutral flux 에 의해서만 일어난다는 전제 하에 RIE Lag 현상에 대한 설명을 시도하고 있다. Knudsen Transport mechanism 는 RIE lag 현상의 발생 원인에 대해 두 가지 측면에서 접근하고 있다[55]. 하나는 tube 나 trench 구조에서의 conductance 감소가 RIE lag 현상의 원인이라는 접근 방식인데 이 conductance 는 아래와 같이 정량적으로 계산할 수 있다.

$$C = 3.64AK(T / M_p)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1.2)$$

여기서  $C$  는 conductance ( $l/s$ ),  $A$  는 식각 구조물의 단면적( $cm^2$ ),  $K$  는 Clausing factor (aspect ratio 에 관계되는 값),  $M_p$  는 식각 부산물의 분자량이다. 위 식에서 aspect ratio 가 증가함에 따라  $K$  는 감소하기 때문에[57] 결국 conductance 가 감



소한다. 그리고 Conductance 가 감소하면 etch rate 가 감소하여 결과적으로 RIE lag 현상이 발생한다. 하지만 이러한 접근으로는 gas flow 에 의해 pattern 입구와 바닥면의 압력 차가 줄어들 때 conductance 가 감소하면서 발생하는 RIE lag 현상을 제대로 설명하기 어렵다는 문제점이 있다.

이와는 다르게 aspect ratio 가 증가할수록 pattern 의 바닥면으로 입사하는 neutral flux 가 감소하여 RIE lag 가 발생한다는 것이 Knudsen Transport mechanism 의 또 다른 접근 방식이다. 이 때, sidewall 에서 소모되는 flux 는 전혀 없다고 가정한다. pattern으로 입사하는 neutral flux 와 바닥면에서 반응을 통해 실제로 소모되는 flux 을 비교해 보면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\nu_t - (1 - K)\nu_t - K(1 - S)\nu_b = S\nu_b \quad (4.1.3)$$

여기서  $\nu_t$  는 pattern으로 입사하는 flux,  $\nu_b$  는 바닥면에 도달하는 flux,  $S$  는 surface 와 neutral 의 반응 확률(reaction probability) 이다. 또한 그림 4.1.6 으로부터 식 4.1.3 좌변의 두 번째 항은 바닥면에 도달하지 못하고 중간에 빠져 나오는 flux 를, 세 번째 항은 바닥면에 도달했지만 표면과 반응하지 않고 되돌아 나오는 flux 를 의미함을 알 수 있으며, 우변은 바닥면에서 반응에 의해 실제로 소모되는 flux 를 뜻함을 알 수 있다. 식 4.1.3 을 전개하여  $\nu_b$  와  $\nu_t$  의 비율을 구해보면 식 4.1.4 와 같이 나타난다. 여기서 etch rate 의 비율이 곧 RIE lag 의 정도를 나타내며 결국 RIE lag 가  $K$  와  $S$  의 함수로 표현됨을 알 수 있다.

$$\frac{\nu_b}{\nu_t} = \frac{K}{K + S - KS} \equiv \frac{\text{etch rate at the bottom}}{\text{etch rate at the top}} \quad (4.1.4)$$

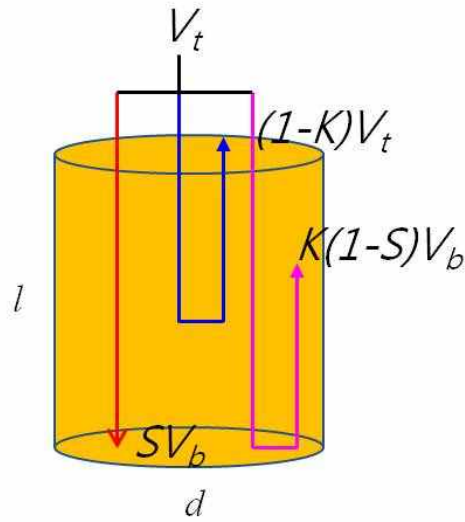


그림 4.1.6 Knudsen Transport mechanism 에 근거한 neutral flux [55]

하지만,  $S$  (reaction probability) 를 파악하는 것이 실제로는 매우 어렵기 때문에 이러한 접근 방식을 실험 결과에 적용하는 데에는 한계가 있다. 또한, sidewall 과의 반응을 완전히 무시하는 접근 방식도 실제 실험에 적용하기에는 무리가 따른다.

반면, Neutral Shadowing mechanism[50][54] 은 sidewall 과 neutral 의 반응 확률이 1 이라고 가정한 상태에서 출발한다. Ion Shadowing mechanism 에서는 aspect ratio 가 증가함에 따라 ion flux 가 감소한다고 설명하는데, 이와 마찬가지로 pattern 으로 입사하는 neutral flux 도 감소할 것이다. Neutral 의 경우 그림 4.1.4 에 묘사된 바와 같이, ion 보다 angular distribution 이 넓다. 따라서 aspect ratio 가 증가함에 따라 바닥면에 입사하는 양은 줄어드는 반면 sidewall 과 반응하게 될 확률이 높아질 것이며 이에 따라 RIE lag 현상이 발생하는 것이다. 하지만 이러한 Neutral Shadowing mechanism 과 Knudsen Transport mechanism 의 경우 ion 의

움직임을 완전히 배제한 상태에서 RIE lag 현상을 설명하고 있다는 큰 문제점이 있다. 실제 etching 은 ion 에 의해 주도적으로 이루어지는 경우가 많기 때문이다.

이상과 같이 RIE lag 현상의 원인을 설명하는 네 가지 대표적인 mechanism 을 살펴보았는데 앞에서 언급한 것처럼 하나의 mechanism 만으로 실험 결과에서 보여주는 현상들을 모두 설명하기에는 어려움이 있다. 이는 앞에서 살펴본 mechanism 들이 실제 경우와는 다르게 ion 이나 neutral 의 움직임에만 치중하여 RIE lag 현상을 설명하고 있기 때문이다.

#### 4.1.3 산화물 식각 과정에서 생기는 RIE lag 현상에 대한 기존 연구 내용

RIE lag 현상은 식각해야 할 pattern 의 aspect ratio 가 다양함으로 인하여 발생하지만 식각에 사용된 plasma etcher 의 종류나 특정 process parameter 의 control 에 따라서 악화되기도 하고 완화되기도 한다. Contact hole 을 식각함에 있어서도 RIE lag 는 피할 수 없는 현상이며 이와 관련하여 CCP etcher[30][58], ICP etcher[59]-[62], ECR etcher[63]-[68] 그리고 기타 high density plasma etcher[32, 69, 70] 등 여러 가지 형태의 장비에서 RIE lag 현상과 관련된 연구 결과가 보고되었다. 이 중 몇 가지 연구 결과에 대하여 간단하게 소개하고자 한다.

Shin-ichi Imai[59] 는 ICP etcher 를 활용한 contact hole 의 식각 실험으로부터 RIE lag 현상과 bias power 의 상관 관계를 밝혀 냈다. 그는 먼저 RIE lag 현상을 분석하기 위해 그림 4.1.7 의 왼쪽과 같이 200mm 직경의 wafer 위에 BPSG (BoroPhosphoSilicate Glass) film 을 APCVD 방법으로 증착한 뒤 hole CD 가 최소  $0.36\mu\text{m}$  에서 최대  $2\mu\text{m}$  까지 split 된 photomask 를 활용하여 PR patterning 한 샘플을 제작하였다. 그리고 다른 process parameter 를 일정하게 유지한 상태에서 bias power 를 700W 에서 1300W 까지 올렸을 때, bias power 가 증가함에 따라 RIE lag 현상이 악화되는 모습을 관찰할 수 있었다. 이는 그림 4.1.7 의 오른쪽과 같이 인가한 bias power 가 높으면 절연체의 sidewall 이나 바닥면에 초기에 입사한 많은 양의 ion 들이 충분한 electron relaxation 을 겪지 못하고 그대로 남아 뒤이어 입사하는 ion 들을 감속시키시는 방향으로 local electric field 를 형성하기 때문이다.

A. C. Westerheim[62] 역시 ICP etcher 를 활용한 contact hole 의 식각 실험을 통해 bias power 의 변화가 RIE lag 에 주는 영향을 연구하였다. 그는 Wafer 위에 Oxide 와 PR 이 차례대로 형성된 샘플을 제작하였고, 이를  $\text{C}_2\text{F}_6$  플라즈마로

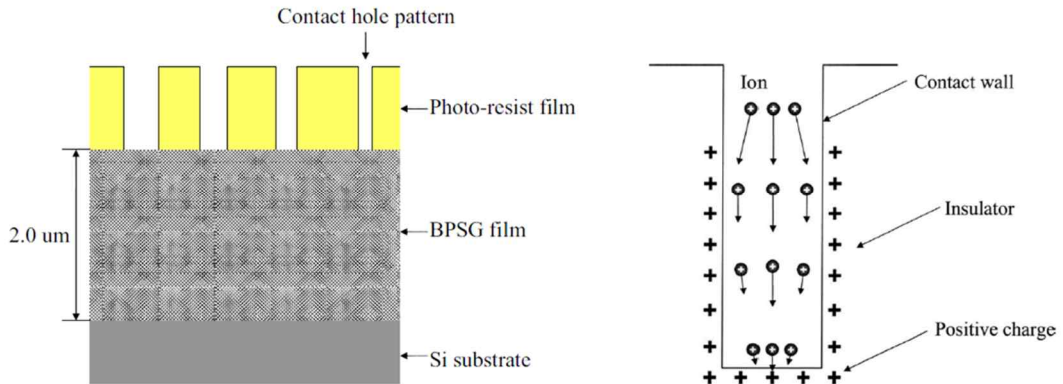


그림 4.1.7 Shin-ichi Imai 실험에서 사용한 샘플 구조 (왼쪽) 와 제안된 bias power dependence mechanism (오른쪽)[59]

식각한 결과 그림 4.1.8 과 같이 750W 정도의 높은 bias power 를 인가하였을 때 differential charging 에 의한 ion flux 감소로 발생하는 전형적인 RIE lag 현상을 관찰할 수 있었다. 반면, 400W 정도의 낮은 bias power 를 인가하였을 경우 inverse RIE lag 현상이 관찰되었다. 이는 샘플의 aspect ratio 가 높을 때 deposition precursor 의 flux 가 감소하는 반면에 샘플의 aspect ratio 가 낮으면 deposition precursor 의 flux 가 증가하여 오히려 식각이 지연되기 때문이다. 게다가 인가한 bias power 가 낮아 식각에 관여하는 ion 의 energy 가 감소하기 때문에 결과적으로 inverse RIE lag 현상이 발생하는 것이다.

하지만 bias power 가 증가한다고 해서 무조건 RIE lag 가 악화되는 것은 아니다. H. H. Doh[63] 는 ECR etcher 를 활용한 contact hole 의 식각 실험에서 dc bias voltage 가 증가함에 따라 (혹은 bias power 가 증가함에 따라) 그림 4.1.9 의 왼쪽과 같이 RIE lag 가 개선되는, 앞에서 살펴본 것과는 다소 상반된 결과를 얻었는데 이는 dc bias voltage 가 증가함에 따라 substrate 에 입사하는 ion energy 가 증가하기 때문이다. 세 개의 연구 결과를 정리해 보면, bias power 의 증가로

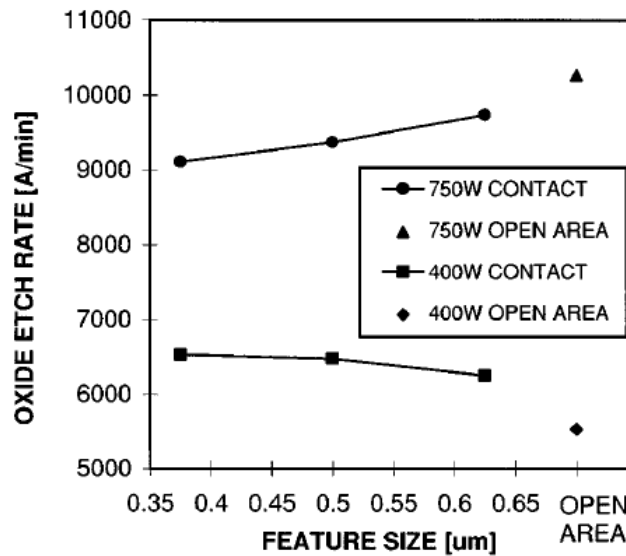


그림 4.1.8 A. C. Westerheim 실험에서 나타난  
bias power 와 RIE lag 의 상관 관계[62]

인한 ion energy 의 증가는 RIE lag 현상을 완화시키는 반면 ion flux 의 지나친 증가는 RIE lag 현상을 악화시키기 때문에 결국 bias power 의 control 을 통해 RIE lag 현상을 개선하려면 ion energy 와 ion flux 를 복합적으로 고려하여 RIE lag 를 최소화할 수 있는 bias power 를 인가하는 것이 중요함을 알 수 있다.

한편, bias power 뿐만 아니라 pressure control 도 RIE lag 개선에 큰 도움이 될 수 있다. H. H. Doh[63] 는 그림 4.1.9 의 오른쪽과 같이 압력과 RIE lag 의 상관 관계도 살펴 보았는데, 압력이 감소할수록 RIE lag 가 개선되는 현상을 관찰할 수 있었다. K. Nojiri[31] 역시 hole CD 가 최소 0.35μm 에서 최대 3.4μm 까지 split 된 PSG film (Phospho Silicate Glass) 샘플을 활용하여 압력과 RIE lag 의 상관 관계를 살펴 보았다. 실험을 위해 동작 압력이 다른 세 가지 type 의 etcher 를 활용하였으며 그 결과 0.4Pa (약 3mT) 의 압력에서도 플라즈마의 안정적인

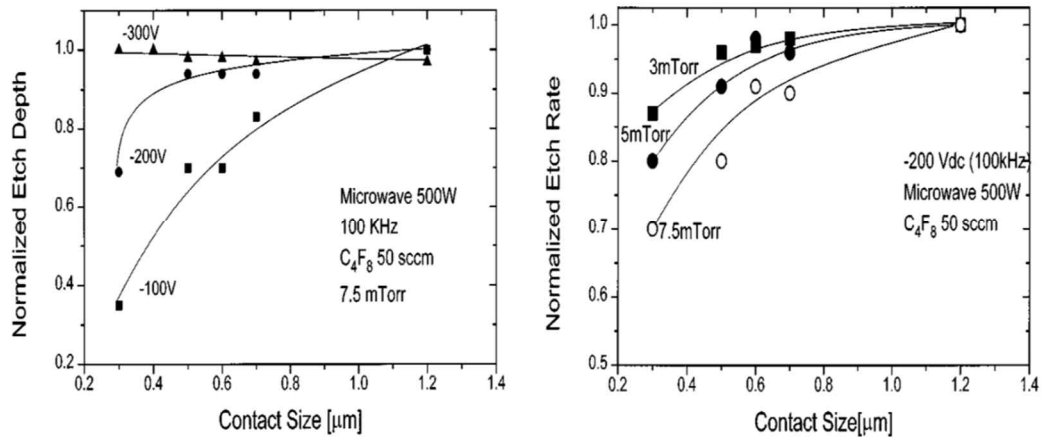


그림 4.1.9 H. H. Doh 실험에서 나타난 bias power (왼쪽) 및 pressure (오른쪽) 와 RIE lag 의 상관 관계[63]

방전이 가능한 ECR etcher 에서 그림 4.1.10 과 같이 RIE lag 가 상당히 개선될 수 있음을 확인하였다. 두 연구 결과와 같이 압력이 감소할수록 RIE lag 가 개선되는 것은 ion 의 mean free path 가 증가하여 ion 이 sidewall 에 충돌하지 않고 바닥면에 수직으로 입사할 확률이 높아지기 때문이다.

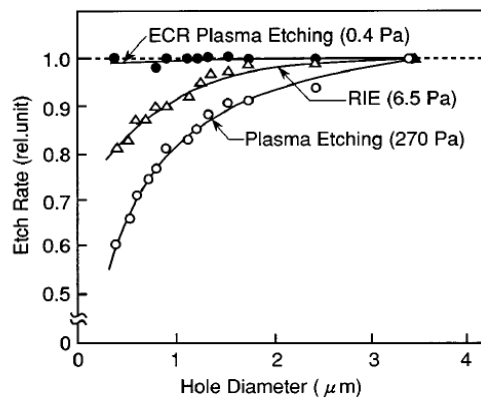


그림 4.1.10 K. Nojiri 실험에서 나타난 pressure 와 RIE lag 의 상관 관계[31]

위에서 살펴 본 bias power 나 pressure 이외에도 contact hole 의 식각 가스가 비휘발성인  $CF_x$  계열의 polymer 를 다량으로 형성하는 경우,  $O_2$  를 첨가하는 것이 RIE lag 개선에 도움이 될 수 있다. T. Akimoto[32] 는 SWP etcher 를 활용한 contact hole 의 식각 실험에서  $O_2$  첨가량에 따른 RIE lag 의 변화를 살펴보았다. 그는 CD 가 최소  $0.25\mu m$  에서 최대  $1.3\mu m$ 까지 split 된 샘플을 식각해 본 결과, 그림 4.1.11 의 왼쪽과 같이  $CF_4, CH_2F_2$  가스에  $O_2$  를 첨가했을 때 RIE lag 가 개선되는 결과를 얻을 수 있었다.

K. Siozawa[68] 역시 ECR etcher 를 활용한 contact hole 의 식각 실험에서  $O_2$  첨가량에 따른 RIE lag 의 변화를 살펴보았다. 그는 CD 가 최소  $0.4\mu m$  에서 최대  $1.0\mu m$  까지 split 된 샘플을  $C_4F_8$  과  $O_2$  를 혼합한 가스로 식각해 본 결과 그림 4.1.11 의 오른쪽과 같이  $O_2$  의 첨가량이 늘어날수록 RIE lag 가 개선될 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는, K. Siozawa 에 의하면,  $O_2$  를 첨가함에 따라 fluorocarbon radical 의 표면 반응 확률이 낮아지면서 결과적으로 바닥면에 증착되는 polymer 의 양이 줄어들었기 때문이다. 그는  $O_2$  첨가와 RIE lag 의 상관 관계를 규명하기 위해 substrate 부근에 tube orifice 를 장착한 후, fluorocarbon molecule 의 mass spectral intensity ratio 를 측정하여 그림 4.1.12 와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 그림을 보면  $O_2$  를 첨가하지 않은 경우  $CF_3$  나  $C_2F_5$  등을 포함한 대부분의 fluorocarbon molecule 의 mass spectral intensity ratio 가 1 에 한참 못 미치는 반면에  $O_2$  첨가량이 늘어남에 따라서 그 값이 1 에 근접하고 있음을 확인할 수 있다. 이는  $O_2$  를 첨가하지 않으면 radical 이 tube orifice 의 sidewall 이나 hole 의 바닥면에 그대로 증착되는 반면에  $O_2$  를 첨가함에 따라 표면 반응 확률이 낮아지면서 sidewall 이나 hole 의 바닥면에 증착되는 현상이 억제되고 있음을 의미한다. 이러한 이유로 인하여  $O_2$  를 첨가했을 때 RIE lag 현상이 개선될 수 있는 것이다.



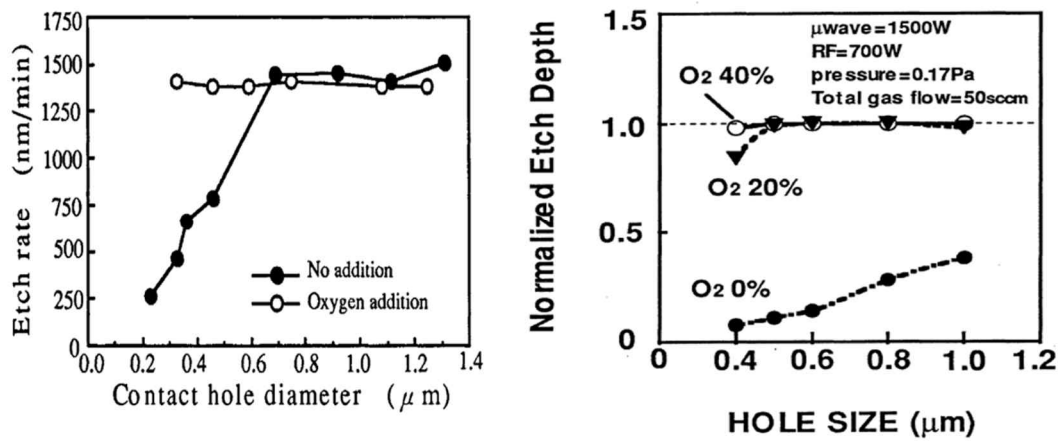


그림 4.1.11 T. Akimoto[32](왼쪽) 와 K. Siozawa[68](오른쪽) 실험에서 나타난  $O_2$  첨가량과 RIE lag 의 상관 관계

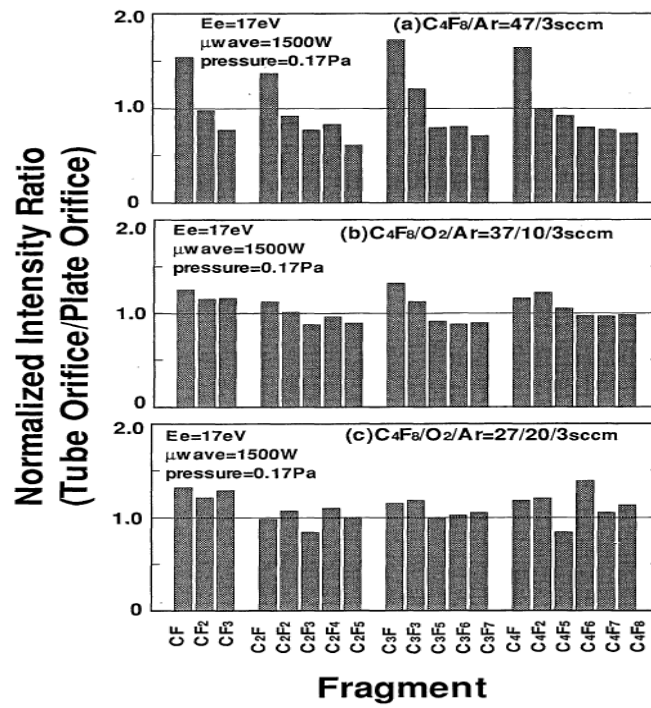


그림 4.1.12 산소 첨가에 따른 mass spectral intensity 비율의 변화[68]

지금까지 contact hole 식각 시 발생하는 RIE lag 현상에 대해 연구한 논문들을 간단히 살펴 보았다. 산화물과 같은 절연체로 이루어진 초미세 pattern을 식각하는 경우, ion 에 의한 물리적 식각과 etchant 에 의한 화학적 식각이 동시에 이루어지기 때문에 ion 의 directionality 를 확보하고 식각에 방해가 되는 부산물을 원활하게 제거해주는 것이 매우 중요하다. 결국 bias power 및 pressure control, O<sub>2</sub> 첨가 유무가 RIE lag 현상을 제어할 수 있는 것도 이와 같은 맥락에서 이해될 수 있다.

본 논문에서 다루고 있는 M-ICP 장치의 경우 자기장을 활용한 플라즈마 confinement 를 통해 플라즈마 밀도를 높이고 그로 인해 etch rate 를 CCP 나 ICP 장치 대비 크게 높일 수 있다는 사실은 여러 차례 검증된 바 있지만 HARC 와 같은 초미세 pattern 을 식각함에 있어서 mask 대비 식각 물질의 selectivity 특성이 어떻게 달라는지, process parameter 의 변화에 따라 RIE lag 현상이 어떻게 나타나는지 등에 대해서는 보고된 바가 거의 없다. 또한 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 에 따라서, 그리고 M-ICP 장치에서 neutral gas pressure 가 감소함에 따라서 mask 대비 selectivity 나 RIE lag 특성이 어떻게 변하는지를 살펴보는 것도 본 연구에서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있겠다.

## 4.2 M-ICP 장치에서 process parameter 에 따른 HARC 식각 특성

4.2 절에서는 M-ICP 장치에서 process parameter 에 따른 HARC 식각 특성을 살펴보도록 하겠다. 실험에 사용된 샘플의 종류와 평가 방법은 4.2.1 절에서 자세히 설명하였다. 다만 ICP 장치 대비 M-ICP 장치의 RIE lag 특성을 살펴봄에 있어서 두 가지의 process parameter 에 주목해 볼 필요가 있는데 이는 바로 neutral gas pressure 와 magnetic flux density 이다.

3장에서 살펴본 바와 같이, M-ICP 장치는 자기장의 인가를 통해서 ICP 대비 고밀도의 플라즈마를 형성할 수 있기 때문에 상대적으로 낮은 neutral gas pressure 에서도 안정적인 동작이 가능하다. 예를 들어, 본 연구에서 RIE lag 특성을 평가할 때 ICP 장치는 플라즈마 방전 유지를 위한 최소 neutral gas pressure 이 0.4Pa (3mT) 였던 반면에, M-ICP 장치의 경우 플라즈마 방전 유지를 위한 최소 neutral gas pressure 이 0.067Pa (0.5mT) 정도로 매우 낮았다. M-ICP 장치가 낮은 neutral gas pressure 에서도 동작이 가능하다는 사실은 다음의 두 가지 측면에서 유리하게 작용할 수 있다. 먼저 시스템 구동의 관점에서 생각해 보면, 3.2.2 절에서 설명한 바와 같이  $\omega < \omega_{ce}$  ( $\omega$  는 input power 의 frequency) 일 때 process chamber 내부로 R-wave 가 전파하는데 이 R-wave 에 의한 cavity resonance 에 의해 효과적인 electron heating 이 발생한다[71]. 중요한 것은, neutral gas pressure 가 낮아지면 collisional broadening 이 약해지면서 cavity resonance 가 강해져 더욱 효과적인 electron heating 이 가능하다는 점이다. 또한 공정 제어의 관점에서 생각해 보면, 4.1.3 절에서 살펴본 바와 같이 neutral gas pressure 가 감소함으로 인해 RIE lag 현상이 개선될 가능성이 많기 때문에 M-ICP 장치가 RIE lag 제어에 효과적일 수 있음을 예상해볼 수 있다.

한편, substrate 에 인가되는 magnetic flux density 의 변화에 따라서도 RIE lag

특성이 달라질 수 있다. 이는 RIE lag 를 개선함에 있어서 ion 의 움직임을 제어하는 것이 핵심인데 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 가 ion energy 및 ion flux 를 제어할 수 있는 중요한 parameter 이기 때문이다. Bulk oxide 혹은 aspect ratio 가 낮은 pattern 에서 자기장을 인가함에 따른 oxide 의 etch rate 나 Oxide-to-ACL selectivity 등을 살펴본 사례는 있었지만[26][33] HARC pattern 에서는 살펴본 바가 없으며 특히 M-ICP 장치에서 발생하는 RIE lag 의 정확한 mechanism 에 대해서는 아직까지 연구가 제대로 이루어진 바 없다.

#### 4.2.1 HARC 샘플의 사양 및 실험 방법

RIE lag 특성을 평가하기 위한 HARC 샘플의 구조를 그림 4.2.1 에 나타내었다. Si wafer 위에 stopping layer 인  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , etching layer 인  $\text{SiO}_2$ , 그리고  $\text{SiO}_2$  patterning 을 위한 ACL mask 와 ACL mask patterning 을 위한 SiON hard mask 가 차례대로 형성되어 있다. 특히 RIE lag 특성 평가를 위해 HARC 의 CD (Critical Dimension) 를 그림과 같이 90, 110, 130, 160, 200nm 등으로 split 하였다. 준비된 샘플은 SiON hard mask 를 식각하여 ACL mask patterning 까지 완료한 상태로 식각 후 남은 SiON hard mask 의 잔여 두께는 약 62nm 이다. 또한 ACL mask 의 두께는 약  $1.1\mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  의 두께는 약  $2\mu\text{m}$ , stopping layer 인  $\text{Si}_3\text{N}_4$  의 두께는 약 150nm이다. ACL 의 정확한 etch rate 를 측정하기 위하여 실제 RIE lag 실험에서는 HARC 샘플을  $\text{CF}_4$  플라즈마에 단시간 노출시켜 (Source power : 750W<sub>S</sub>, Bias power : 400W<sub>B</sub>, Pressure : 0.67Pa, Gas flow rate : 100sccm, Exposure time : 15sec) 남아 있는 SiON hard mask 를 완전히 제거한 후  $\text{SiO}_2$  식각 실험을 진행하였다.

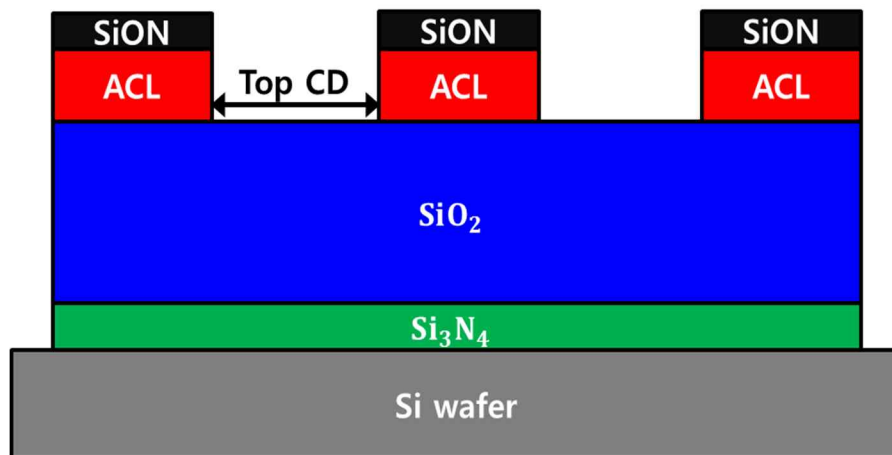


그림 4.2.1 RIE lag 특성 평가를 위한 HARC 의 구조

그림 4.2.2 는 SiON hard mask 제거 전후의 HARC 측면을 FE-SEM (Hitachi 社, Model : S-4800) 으로 측정한 것이다. ACL mask 와 SiON hard mask 의 경계면이 모호하여 FE-SEM 으로 정확하게 판별하기는 어려우나 식각 후 SiO<sub>2</sub> 상단부에 남아 있는 layer 의 두께가 약 1.1 $\mu$ m 라는 사실로부터 CF<sub>4</sub> 플라즈마를 이용하여 SiON hard mask 를 효과적으로 제거하고 ACL layer 만 남길 수 있었음을 간접적으로 확인해볼 수 있었다.

상기의 샘플을 이용해 RIE lag 가 bias frequency, pressure, bias power, source power, gas ratio, 그리고 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 등이 변화함에 따라 어떻게 달라지는지를 평가하였다. 식각 가스는 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 과 Ar 을 혼합해 사용하였으며 기본적으로 gas pressure 0.4Pa, source power 750W<sub>S</sub>, bias power 500W<sub>B</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 2.6sccm, Ar 4sccm 의 방전 조건에서 출발하였다. 또한 RIE lag 특성 외에 ACL 과 Oxide 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 와 process parameter 에 따른 profile 의 top, bowing, bottom CD 등을 측정해 보았다.

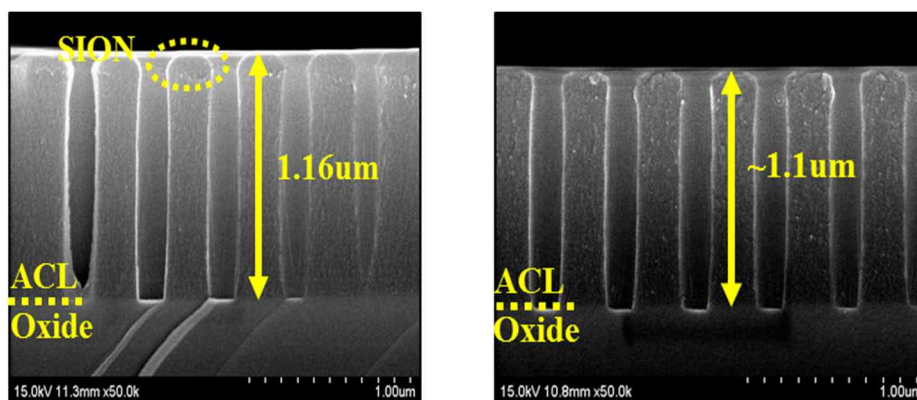


그림 4.2.2 SiON 제거 전후의 HARC 측면 (Top CD : 160nm)

(Source power : 750W<sub>S</sub>, Bias power : 400W<sub>B</sub>, Pressure : 0.67Pa,

Gas flow : CF<sub>4</sub> 100sccm, Exposure time : 15sec)

한편, RIE Lag 는 아래와 같은 식으로 정량적인 계산이 가능하다.

$$\text{RIE Lag (\%)} = 100 - \frac{\text{lowest etch depth}}{\text{highest etch depth}} \times 100 \quad (4.2.1)$$

앞에서 잠깐 설명한 바와 같이 RIE lag 는 동일한 pattern 내에서도 etch depth 혹은 etch time 이 증가함에 따라 발생할 수 있다. 이 때문에 process parameter 에 따른 RIE lag 특성을 정확하게 평가하기 위해서는 특정 CD 를 가지는 pattern 의 etch depth 를 최대한 동일하게 맞춰 줄 필요가 있다. 따라서 process parameter 별 RIE lag 관찰 시 식각 실험을 1차와 2차로 나누어 진행하였으며, 1차에서는 4분 동안 etching 후 FE-SEM 을 통한 etch depth 측정으로 oxide etch rate 를 계산하였고 2차에서는 1차에서 계산된 oxide etch rate 를 바탕으로 oxide etch depth 가 900nm (Top CD 90nm pattern 기준) 가 되도록 하는 시간 동안 식각을 진행하였다. 이후 FE-SEM 을 이용해 90nm pattern 을 포함한 모든 pattern 에 대한 etch depth 를 측정하여 RIE lag 특성을 평가하였다.

한편, process parameter 별 RIE lag 현상을 보다 정확하게 이해하기 위하여 dual Langmuir probe (DLP), single Langmuir probe (SLP)[72], actinometric optical emission spectroscopy (A-OES)[73], ion energy analyzer (IEA)[33] 등을 활용한 플라즈마 진단을 수행하였다. DLP 를 활용한 진단법의 경우 3.3.1 절에서 소개한 바 있으며, 본 실험에서는 probe 를 substrate 로부터 약 2.8cm 떨어진 높이에 위치시켜 측정을 진행하였다. 측정 가스는 Ar 을 사용하였으며 Ar 의 flow rate 는 식각 실험에서 사용한 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 및 Ar 혼합가스의 total flow rate (6.6sccm) 와 같은 값으로 설정하였다.

SLP 는 플라즈마에 노출된 1개의 probe 에 흐르는 전류와 전압을 활용해

electron energy probability function (EPPF) 및 electron energy distribution function (EEDF) 를 얻어내기 위한 진단 장치로 EPPF 및 EEDF 는 아래의 식을 통해 구할 수 있다[12].

$$g_p(E) = \frac{2m}{e^2 A} \left( \frac{2e}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d^2 I_e}{dV^2} \quad (4.2.2)$$

$$g_e(E) = \frac{2m}{e^2 A} \left( \frac{2eV}{m} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e}{dV^2} \quad (4.2.3)$$

SLP 측정 시에는 DLP 의 경우와 마찬가지로 probe 를 substrate 로부터 약 2.8cm 떨어진 높이에 위치시켰으며 측정 가스는 Ar 을 사용하였다. Ar 의 flow rate 는 6.6sccm 으로 식각 실험에서 사용한 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 및 Ar 혼합가스의 total flow rate 과 같았다.

A-OES 는 Ar 750.4nm 를 actinometer 로 활용하여 공간에 분포하는 radical 의 atomic density 를 측정하는 방법이다. 본 논문의 경우 oxide 의 주요 etchant 인 F 703.7nm 과 polymer precursor 로 알려진 CF<sub>2</sub> 251.9nm 의 emission line intensity 를 측정하였다. 결과적으로, F 와 CF<sub>2</sub> 의 atomic density 는 다음의 식으로부터 계산된다[74].

$$n_F = K_F n_{Ar} \times \frac{I_F}{I_{Ar}}, \quad n_{CF_2} = K_{CF_2} n_{Ar} \times \frac{I_{CF_2}}{I_{Ar}} \quad (4.2.4)$$

여기서  $K_F$  와  $K_{CF_2}$  는 각각 Ar 에 대한 F 와 CF<sub>2</sub> 의 electron-impact cross section 의 비율로 결정되는 상수이며 그 값은 보통 0.56 과 0.35 이다[75].  $n_{Ar}$  은 Ar 의 밀도이며 챔버 내에서의 partial pressure 에 의해 결정되는 값이다. 그리고  $I_F$



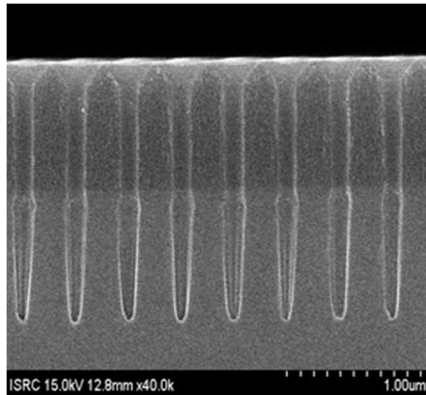
와  $I_{CF_2}$  는 각각 F 와  $CF_2$  의 해당 파장에서의 emission line intensity 를 의미한다. 또한 DLP, SLP 및 A-OES 측정 시 bias 전극은 그라운드 상태를 유지하였다.

마지막으로 Ion energy distribution 및 ion flux 는 연구실에서 자체 개발한 IEA[33][76] 를 활용하여 측정이 이루어졌다. 측정 가스는 Ar 을 사용하였으며 DLP 및 SLP 측정 시와 마찬가지로 Ar 의 flow rate 는 식각 실험에서 사용한  $C_4F_8$  및 Ar 혼합가스의 total flow rate (6.6sccm) 와 같은 값으로 설정하였다.

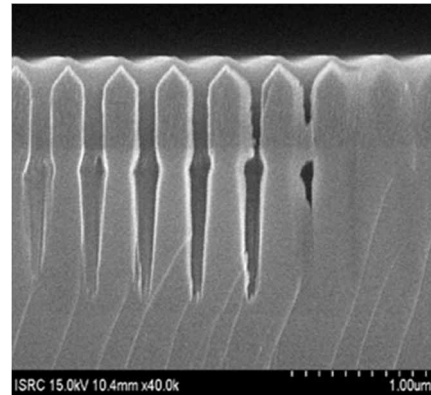
#### 4.2.2 Bias frequency 의 영향

4.2.2 절에서는 bias frequency 가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보고자 한다. 이를 위한 방전 조건을 gas pressure 는 0.4Pa (3mT), source power (27.12MHz) 는 750W<sub>S</sub>, bias power 는 500W<sub>B</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 은 2.6sccm, Ar 은 4sccm, B<sub>substrate</sub> 은 8Gauss 로 고정한 상태에서 2MHz 와 13.56MHz 의 bias frequency 를 사용하여 식각을 진행하였다. 그리고 top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.3 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.4 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 13.56MHz 의 bias frequency 를 사용하였을 때 2MHz 대비 bowing 현상이 좀 더 두드러지고 top CD 도 식각 전후로 다소 벌어져 있음을 확인할 수 있다. 또한 식각이 이루어진 바닥면 또한 고르지 못하여 정확한 bottom CD 및 etch depth 를 측정하는 것이 불가능했지만 개략적으로 적게는 720nm, 많게는 930nm 정도로 etch depth 가 pattern 마다 불균일하게 분포하고 있었다. 그에 비하면 2MHz 의 bias frequency 를 사용한 경우, 13.56MHz 대비 상대적으로 top CD 및 bowing CD 가 작았다.

한편 ACL, oxide 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 그림 4.2.5 에 나타나 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 2MHz 의 bias frequency 를 사용하였을 때 ACL 및 oxide 의 etch rate 이 더 높았으며, 13.56MHz 대비 2MHz 의 bias frequency 를 사용했을 때 oxide etch rate 의 증가율이 약 44% 로 큰 반면 ACL etch rate 의 증가율은 22% 정도로 작아 결과적으로 2MHz 의 bias frequency 를 사용했을 때 Oxide-to-ACL selectivity 가 약 34% 정도 향상되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 2MHz



(b) 13.56MHz

그림 4.2.3 Bias frequency 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

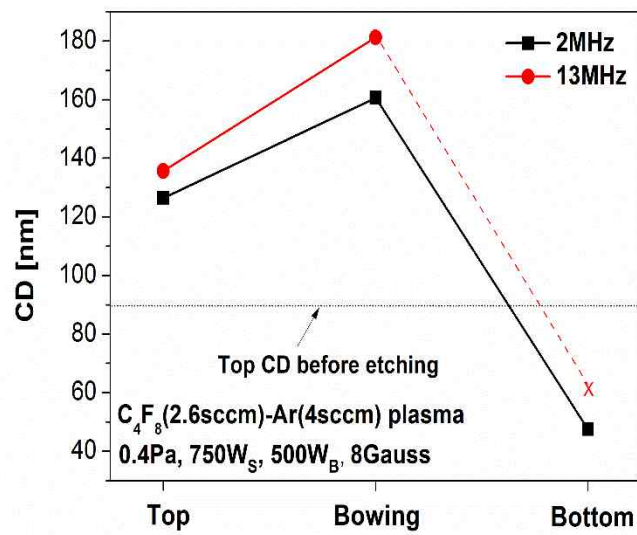
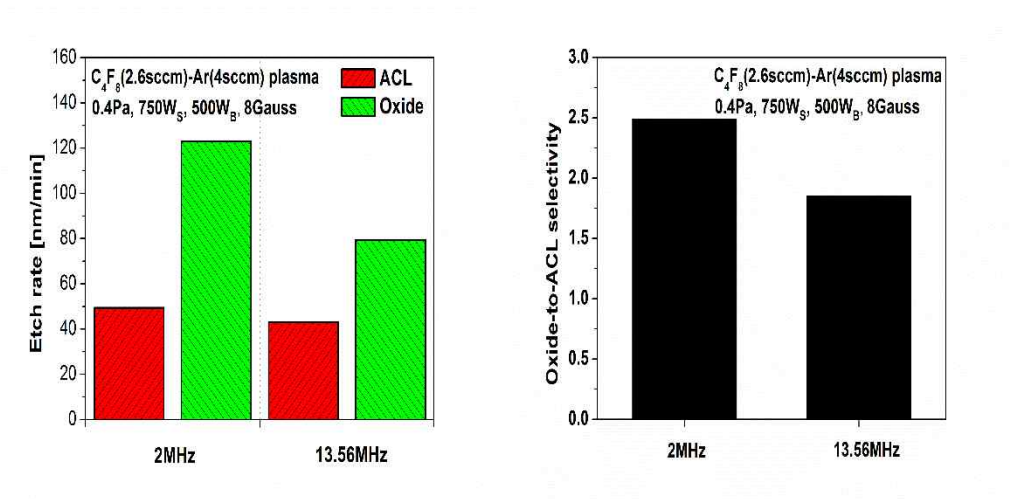


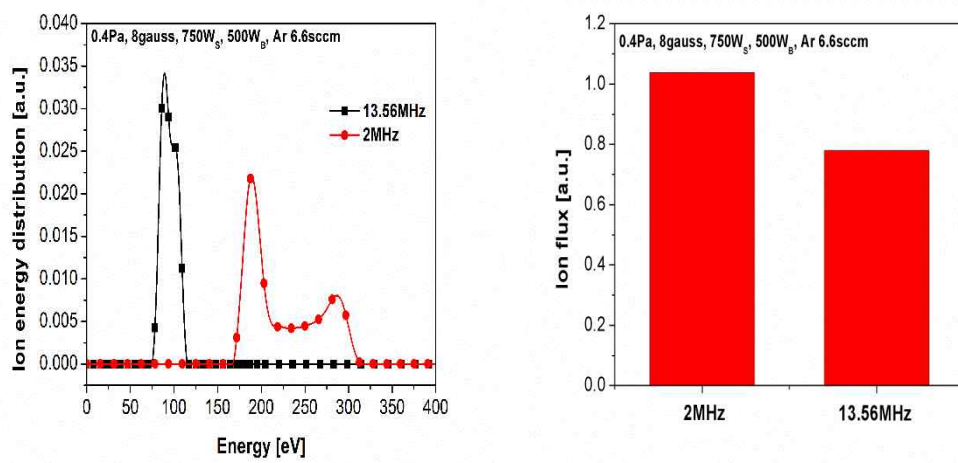
그림 4.2.4 Bias frequency 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD



(a)

(b)

그림 4.2.5 Bias frequency 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity



(a)

(b)

그림 4.2.6 Bias frequency 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

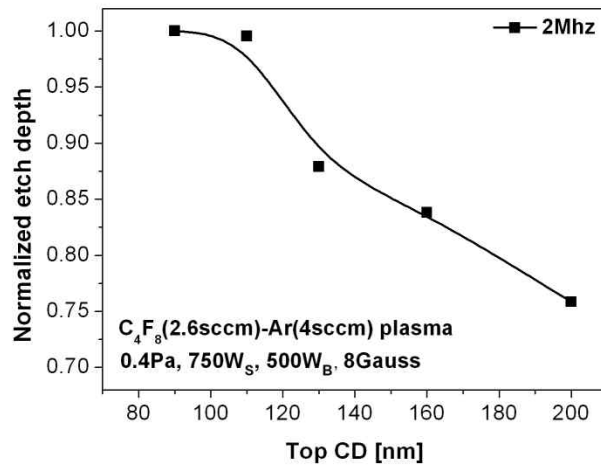


그림 4.2.7 HARC pattern 의 다양한 top CD (90, 110, 130, 160, 200nm)에 따른 normalized etch depth (Bias frequency : 2MHz)

그림 4.2.6 은 bias frequency 변화에 따른 ion energy distribution 및 ion flux 를 측정 한 결과를 보여주고 있다. 2MHz 의 bias frequency 를 사용한 경우, 13.56MHz 대비 훨씬 높은 energy 를 가지는 ion 이 분포하고 있으며 ion flux 도 증가하고 있음을 볼 수 있다. 높은 energy 를 가지는 ion 이 많이 분포할 경우 ion 의 directionality 가 증가하기 때문에 결과적으로 2MHz profile 의 top, bowing CD 가 13MHz profile 대비 작은 것으로 보이며 동시에 ion flux 가 증가함에 따라 oxide 의 etch rate 도 증가했을 것이라고 생각된다. 특히 2MHz 의 경우 ion energy 및 ion flux 가 동시에 증가하여 그만큼 13.56MHz 대비 oxide etch rate 의 증가율이 큰 것으로 보인다. 반대로 13.56MHz 의 경우 ion energy 가 낮아 sidewall 에 도달하는 ion 이 많고, ion flux 도 적어 oxide etch rate 는 물론 Oxide-to-ACL selectivity 도 2MHz 대비 크게 떨어진 것으로 생각된다.

그림 4.2.7 은 2MHz 의 bias frequency 를 사용하였을 때, HARC pattern 의 top

CD 에 따른 normalized etch depth 를 측정한 결과이다. (13MHz 의 경우, 바닥면 이 고르지 못하여 정확한 etch depth 를 측정하는 것이 어려워 평가 대상에서 제외하였다.) 이 결과를 바탕으로 식 4.2.1 을 이용해 계산된 RIE lag 는 약 24.1% 정도로 top CD 의 변화에 따른 etch depth 의 편차가 다소 컸다. 또 하나 주목할 만한 사실은 오히려 top CD 가 감소함에 따라 etch depth 가 증가하는 (혹은 etch rate 가 증가하는) inverse RIE lag 가 나타났다는 점인데 이는  $C_4F_8$  과 같은 fluorocarbon 계열의 gas 를 사용할 때 발생할 수 있는 현상으로 알려져 있다 [18]. 이에 대한 자세한 설명은 4.2.3 절에서 하도록 하겠다.

실험에서 보여준 결과들을 요약해 보면 13MHz 보다는 2MHz 의 bias frequency 를 이용했을 때 HARC 의 top CD 및 bowing CD 가 작다. 또한 oxide 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 높다. 다만 inverse RIE lag 수치가 20% 이상으로 다소 높은 결과가 나왔다.

### 4.2.3 Magnetic flux density 의 영향

4.2.3 절에서는 substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density 가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다. 이를 위한 방전 조건을 bias frequency 는 2MHz, gas pressure 는 0.4Pa (3mT), source power (27.12MHz) 는 750W<sub>S</sub>, bias power 는 500W<sub>B</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 은 2.6sccm, Ar 은 4sccm 로 고정한 상태에서 substrate 중심에 인가되는 magnetic flux density ( $B_{\text{substrate}}$ ) 를 0Gauss, 4Gauss, 8Gauss, 12Gauss, 15Gauss 등으로 조절하면서 식각을 진행하였다. 그리고 Top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.8 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.9 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 top CD 의 경우 0, 4, 8Gauss 에서의 차이는 미미하지만 자기장의 세기가 증가함에 따라 커지고 있으며 bowing CD 역시 자기장의 세기가 증가함에 따라 커지고 있다. 특히, 12Gauss 와 15Gauss 의 경우 bowing CD 가 많이 증가하였다.

그림 4.2.10 에는 magnetic flux density 에 따른 ACL, oxide 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 나타나 있다. ACL 과 oxide 의 etch rate 가 8Gauss 까지는 자기장의 세기가 증가함에 따라 같이 증가하다가 그 이후에는 감소하고 있다. 특히 자기장의 세기가 8Gauss 일 때의 oxide 의 etch rate 는 ICP (0Gauss) 대비 약 3배 이상 빨랐다. 하지만 위와 같은 oxide etch rate 의 경향성은 그림 4.2.12 에 나와 있는 F 의 atomic density 나 plasma density, 그리고 그림 4.2.14(b) 에 제시된 ion flux 의 경향성과는 다소 상반된다. 이는 그림 4.2.14(a) 와 같이 magnetic flux density 가 12Gauss 혹은 15Gauss 로 높을 때 ion 이 상대적으로 낮은 에너지 영역에 분포하여 ion 의 directionality 가 감소하면서 바닥면에 도달하는 양이 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 이러한 이유로 인하여

12Gauss 혹은 15Gauss 에서 관찰되는 profile 의 top CD 및 bottom CD 가 식각 전후로 많이 증가한 것으로 보인다.

한편, Oxide-to-ACL selectivity 의 경우 oxide etch rate 의 경향성이 많이 반영된 것으로 보인다. 왜냐하면 0Gauss 에서 4Gauss 로 magnetic flux density 가 증가할 때 그림 4.2.12(a) 및 그림 4.2.14(b) 와 같이 F 의 atomic density 및 ion flux 가 급증하여 oxide etch rate 도 크게 증가한 반면, 8Gauss 이후에는 오히려 지속적으로 감소하는데 Oxide-to-ACL selectivity 역시 oxide etch rate 이 급증한 4Gauss 전후로 그 크기가 감소하는 경향을 보여주고 있기 때문이다. 결과적으로 자기장의 인가를 통해 ICP (0Gauss) 대비 Oxide-to-ACL selectivity 를 최대 44% 정도 개선할 수 있었다.

그림 4.2.11 에는 substrate 중심의 magnetic flux density 에 따른 HARC pattern 의 normalized etch depth 를 측정한 결과가 나타나 있다. 자기장의 세기가 8Gauss 로 증가할 때까지는 RIE lag 가 감소하다가 12Gauss 부터 다시 증가하는 경향을 보여주었다. 이러한 경향성 역시 12Gauss 및 15Gauss 에서 ion energy 가 감소함으로써 인해 바닥면의 식각이 제대로 이루어지지 못했기 때문에 나타나는 것으로 보인다. 주목할 만한 점은, ICP (0Gauss) 에서는 normal RIE lag 특성이 나타나는 반면, M-ICP 에서는 inverse RIE lag 특성이 나타난다는 것이다. 이는 그림 4.2.12(a) 와 같이 A-OES 를 활용하여 측정한  $CF_2$  의 atomic density 가 자기장을 인가하면서 급증하기 때문이다. 이러한 현상이 나타난 원인은 그림 4.2.13 에 나타나 있는 EEPF 로부터 추정해볼 수 있다.  $CF_2$  가  $C_4F_8$  으로부터 해리되기 위해 필요한 전자의 threshold energy 가 약 10.5eV 인데[77] 그림을 보면 10.5eV 이상의 에너지를 가지는 전자가 분포할 확률이 M-ICP 가 더 높다는 사실을 알 수 있다. 게다가 M-ICP 의 경우 ICP 대비 ion flux 가 높다고 할지라도 ion energy 가 상당히 낮기 때문에 ion bombardment 에 의한 polymer 제거가 어려울



것이다. 따라서 ICP 와 달리 M-ICP 에서는 상대적으로 polymer-rich 한 환경이 조성되면서 inverse RIE lag 특성이 나타날 수 있음을 짐작해 볼 수 있다.

실험에서 보여준 결과들을 요약하면, magnetic flux density 가 지나치게 높을 경우 oxide 식각에 기여하는 F 의 atomic density 및 ion flux 가 증가하더라도 ion energy 가 감소하여 oxide etch rate 이 떨어지고 RIE lag 특성이 악화될 수 있다. 하지만 substrate 부근의 magnetic flux density 가 너무 높지 않고 적당할 경우 oxide etch rate 을 극대화하고 Oxide-to-ACL selectivity 특성을 개선할 수 있음은 물론 RIE lag 도 줄어들었다. 다만 3.3.3 절에 제시된 M-ICP case 7 의 전자 온도나 상기의 식각 결과들을 종합해 보았을 때 본 M-ICP 장치에서는 ECR 효과가 뚜렷하게 관찰되지 않았는데 그 이유는 크게 두 가지가 있다. 첫째, microwave source 를 사용하는 ECR plasma etcher 에 비해 rf source 를 사용하는 M-ICP 장치는 input power 의 주파수가 전자와 중성 입자 간의 충돌 주파수 (일반적으로  $10^7 \sim 10^8 \text{Hz}$ ) 보다 작아 ECR 현상이 일어나기 힘들다. 둘째, 본 연구에서 사용한 input power 는 약 1000W 내외인데 input power 가 높으면 플라즈마 밀도가 증가하면서 전자와 전자 간의 충돌 주파수가 늘어나 ECR 이 발생할 수 있는 자기장 하에서 electron heating 이 효과적으로 이루어질 수 없다[45]. 그렇지만 M-ICP 장치에서 magnetic flux density 의 최적화를 통해 substrate 에 입사하는 ion flux 를 증가시켜 etch rate 을 개선하고 RIE lag 를 제어할 수 있음을 본 실험을 통해 분명하게 확인할 수 있었다.

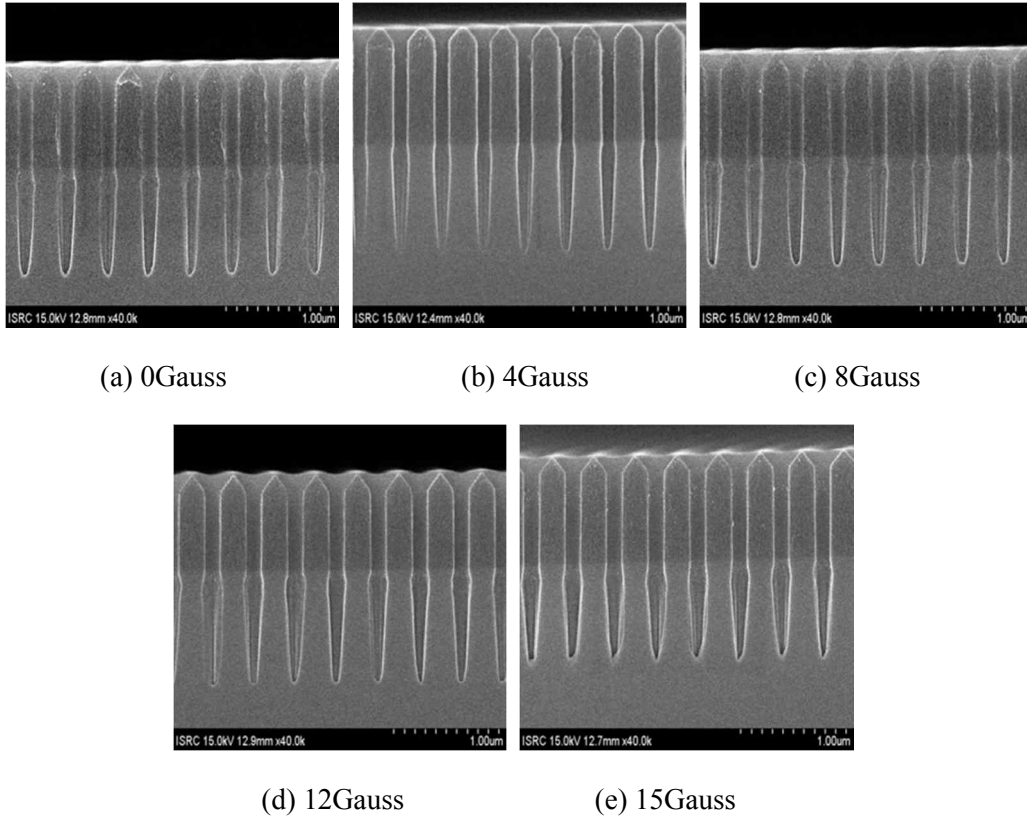


그림 4.2.8 Magnetic flux density 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

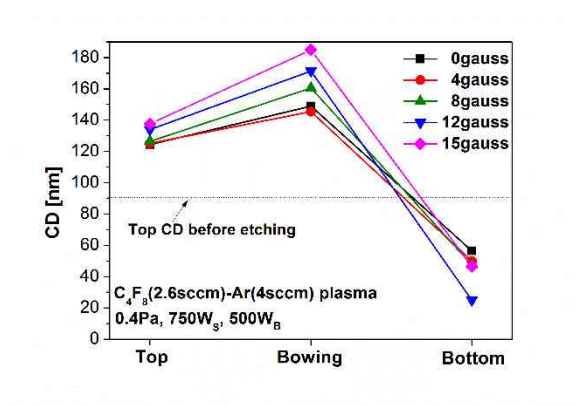
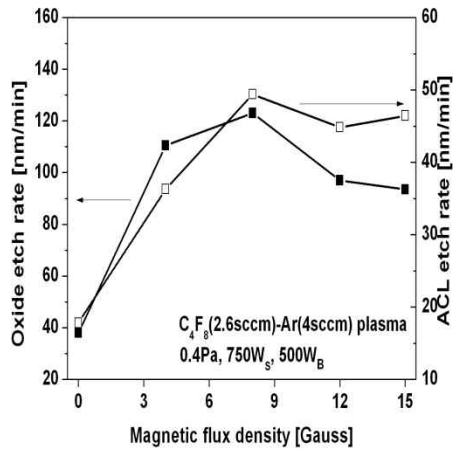
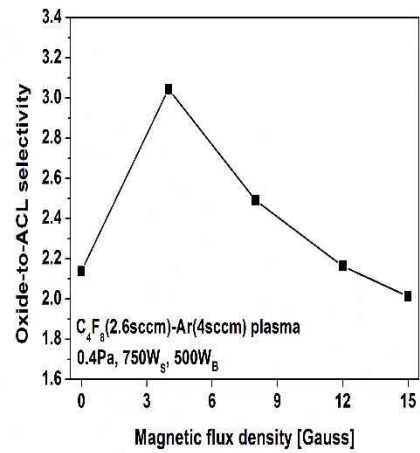


그림 4.2.9 Magnetic flux density 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

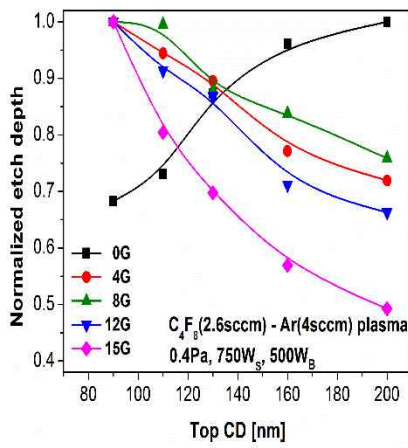


(a)

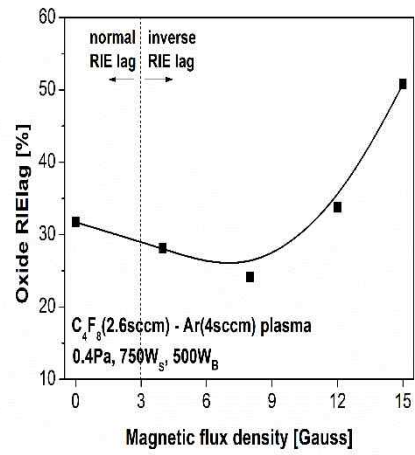


(b)

그림 4.2.10 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Etch rate,  
(b) Oxide-to-ACL selectivity

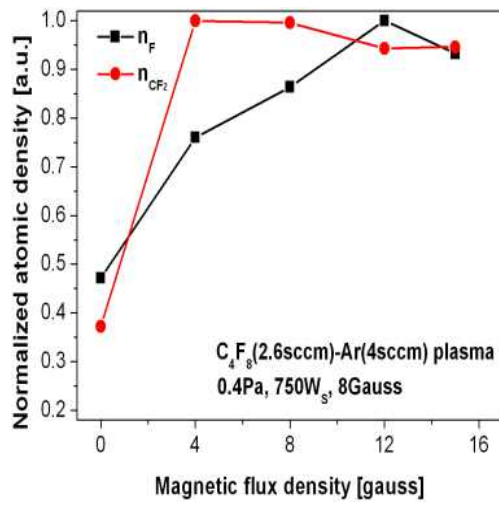


(a)

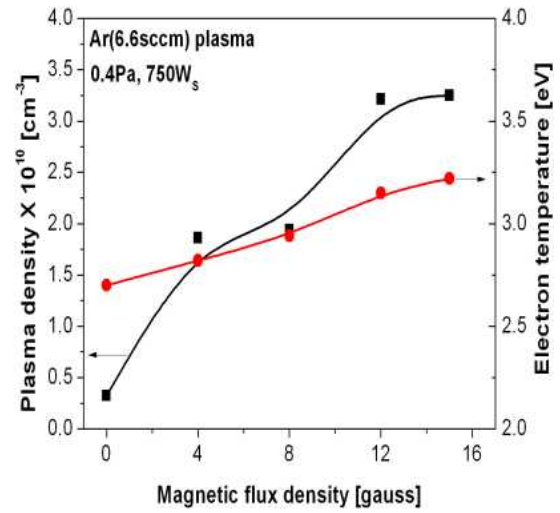


(b)

그림 4.2.11 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag



(a)



(b)

그림 4.2.12 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) Normalized atomic density,  
(b) 플라즈마 밀도 및 전자 온도

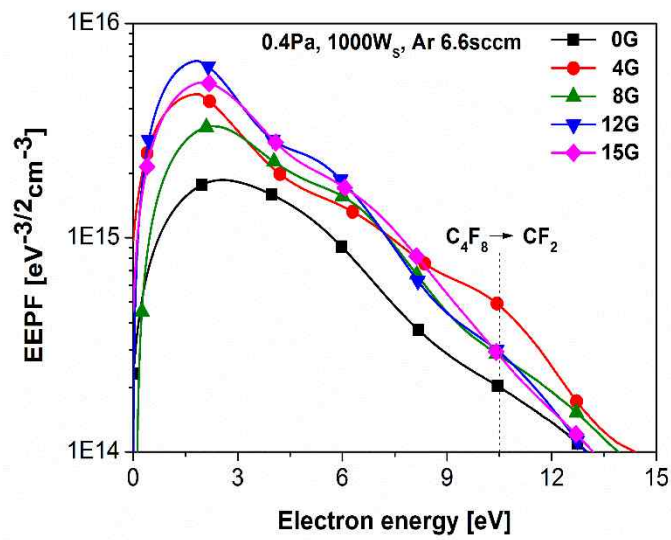
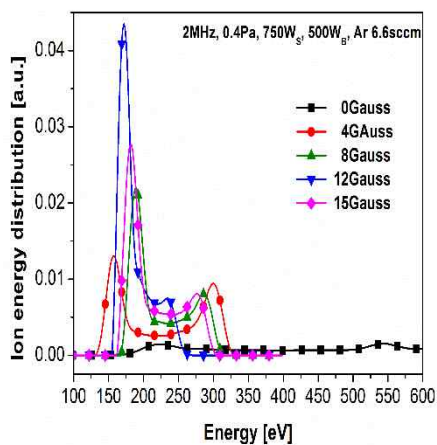
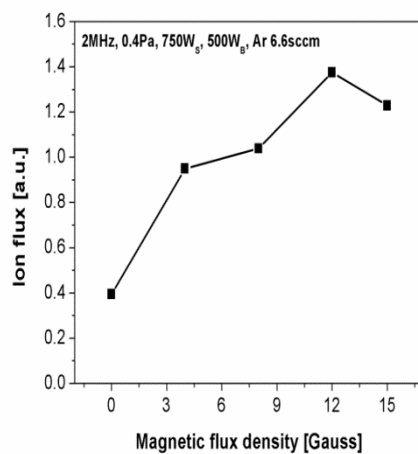


그림 4.2.13 Magnetic flux desntiy 에 따른 EEPF 측정 결과



(a)



(b)

그림 4.2.14 Magnetic flux desntiy 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

#### 4.2.4 Neutral gas pressure 의 영향

4.2.4 절에서는 neutral gas pressure 의 변화가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보고자 한다. 이를 위한 방전 조건을 source power (27.12MHz) 는 750W<sub>S</sub>, bias power (2MHz) 는 500W<sub>B</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 은 2.6sccm, Ar 은 4sccm, B<sub>substrate</sub> 은 8Gauss 로 고정한 상태에서 neutral gas pressure 를 0.067Pa (0.5mT), 0.14Pa (1mT), 0.4Pa (3mT), 0.67Pa (5mT) 로 조절하면서 식각을 진행하였다. 그리고 Top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.15 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.16 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 0.4Pa 또는 0.67Pa 의 높은 압력 조건 하에서 식각이 진행된 샘플의 경우 bowing 현상이 두드러졌다. 특히 0.67Pa 의 경우 top CD 도 식각 전후로 많이 벌어져 있으며 바닥면 에서는 etch stop 이 발생하였다. 이와 반대로 0.067Pa 혹은 0.14Pa 의 낮은 압력 조건 하에서 식각을 진행한 샘플의 profile 을 관찰해 보면 bowing CD 가 상대적으로 작았으며 etch stop 없이 바닥면까지 곧게 식각이 진행된 것을 확인할 수 있다.

한편 ACL, oxide 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 그림 4.2.17 에 나타나 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 ACL 의 경우 압력이 증가함에 따라 etch rate 가 계속 증가하는 반면, oxide 의 경우 0.4Pa 까지는 압력이 증가함에 따라 etch rate 가 천천히 증가하다가 그 이후 etch stop 으로 인해 오히려 감소하고 있다. 한 가지 특징이 있다면 0.067Pa 에서의 oxide etch rate 이 0.4Pa 에서의 oxide etch rate 의 85.7% 수준으로 예상보다 높다는 점이다. 이는 압력이 감소함에 따라 그림 4.2.19 과 같이 F density 및 plasma density 등이 감소함에도 불구하고 그림 4.2.20(b) 와 같이 ion flux 가 압력이 낮을수록 증가하기 때문인 것으

로 보인다. 이와는 반대로 0.4Pa 이나 0.67Pa 의 경우 F density 및 plasma density 는 높지만 ion flux 가 낮아 oxide etch rate 증가율이 크지 않거나 오히려 감소하는 것으로 보이며, 특히 0.67Pa 의 경우 낮은 ion energy 로 인해 profile 의 top CD 및 bowing CD 도 증가하는 것으로 생각된다. 한편, Oxide-to-ACL selectivity 의 경우 저압에서의 oxide etch rate 이 고압에서의 oxide etch rate 에 비해 크게 낮지 않은 반면, ACL etch rate 의 경우 압력 증가에 따라 지속적으로 증가하면서 결과적으로 저압에서 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 4.2.18 에는 neutral gas pressure 에 따른 HARC pattern 의 normalized etch depth 를 측정한 결과이다. 압력이 감소하면서 ion flux 가 증가함으로 인해 RIE lag 특성이 개선되어 0.067Pa 에서 식각한 샘플의 경우 RIE lag 가 10% 미만으로 감소하였다. 주목할 만한 점은 실험에서 상대적으로 저압 영역에 속하는 0.067Pa 및 0.14Pa 조건에서는 normal RIE lag 특성이 나타난 반면, 고압 영역에 해당하는 0.4Pa 및 0.67Pa 조건에서는 inverse RIE lag 가 나타나고 있다는 점이다. 이는 그림 4.2.19(a) 와 같이 A-OES 를 활용하여 측정한  $CF_2$  의 atomic density 가 고압 영역에서 더 높은 것이 주요 원인으로 생각된다. 게다가 ion bombardment 에 의한 polymer 제거의 관점에서 생각해 보면, 저압 영역에서의 ion energy 는 고압 영역 대비 그리 높지 않더라도 (그림 4.2.20(a)) ion flux 가 상당히 높기 때문에 상대적으로 polymer 제거가 저압 영역에서 더 원활하게 이루어질 수 있을 것이다. 따라서 저압 영역에서는 polymer-poor 한 환경이 조성되는 반면 고압 영역에서는 polymer-rich 한 환경이 조성되면서 inverse RIE lag 특성이 나타날 수 있음을 짐작해 볼 수 있다

종합적으로 고찰해 보았을 때, 0.4Pa 이상의 높은 압력에서 식각을 진행하게 되면 oxide etch rate 는 어느 정도 높아질 수 있으나 낮은 ion energy 및 낮은 ion flux 로 인한 profile 왜곡이나 etch stop 의 가능성이 있을 수 있는 반면, M-ICP

장치의 장점을 활용하여 극도로 낮은 압력 하에서 식각을 진행하면 oxide etch rate 의 큰 감소 없이 vertical 한 profile 을 형성할 수 있음은 물론, 높은 ion flux 로 인한 RIE lag 개선 효과도 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.



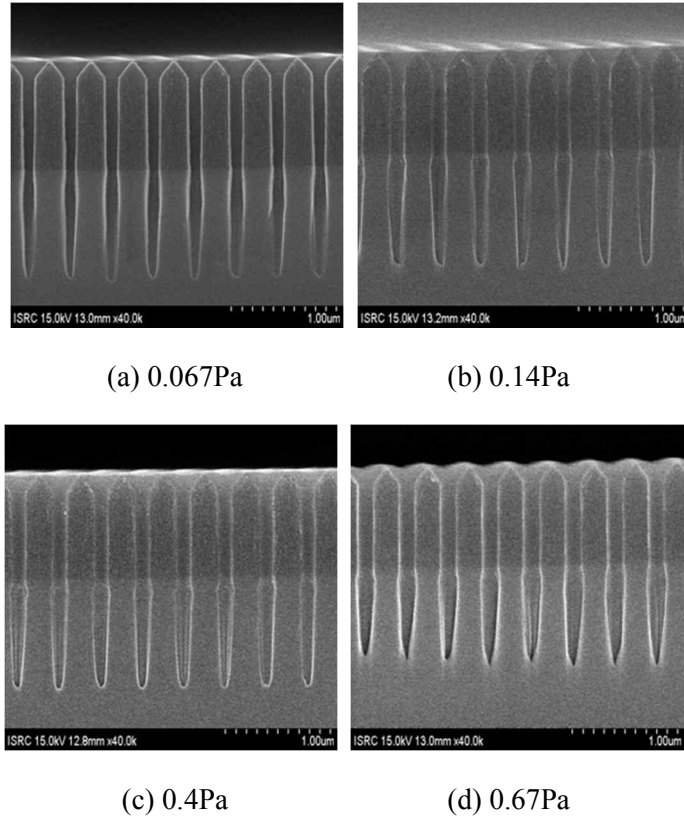


그림 4.2.15 Neutral gas pressure 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

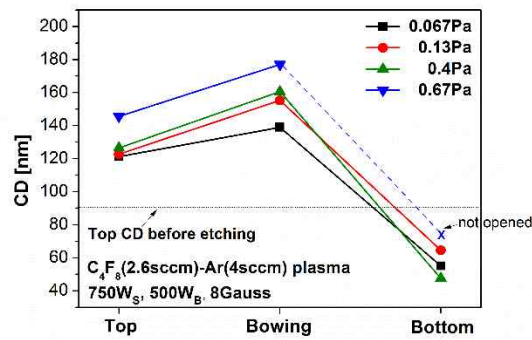
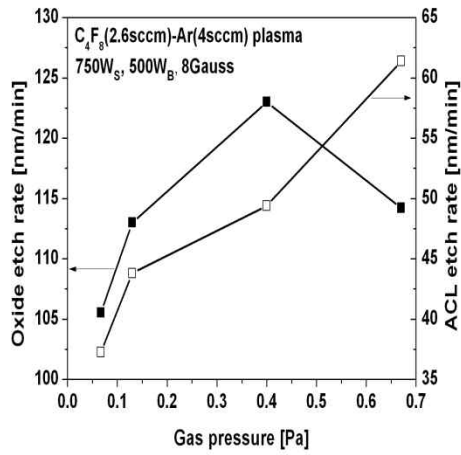
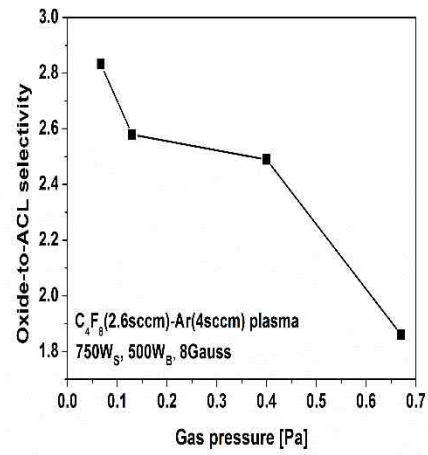


그림 4.2.16 Neutral gas pressure 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

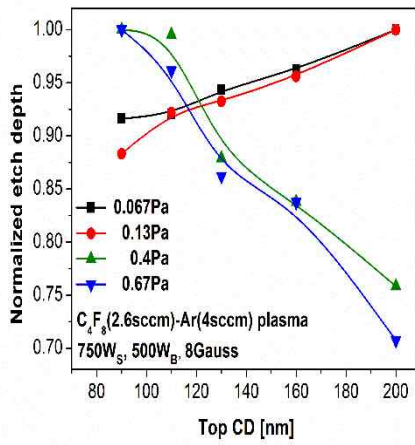


(a)

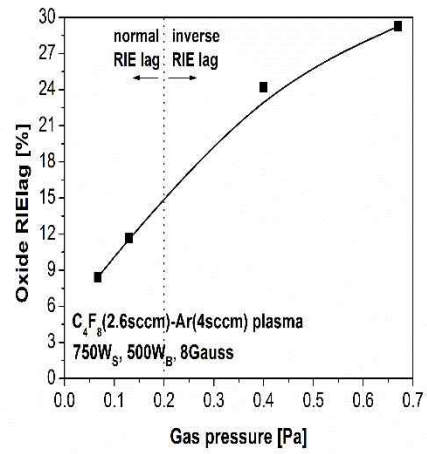


(b)

그림 4.2.17 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

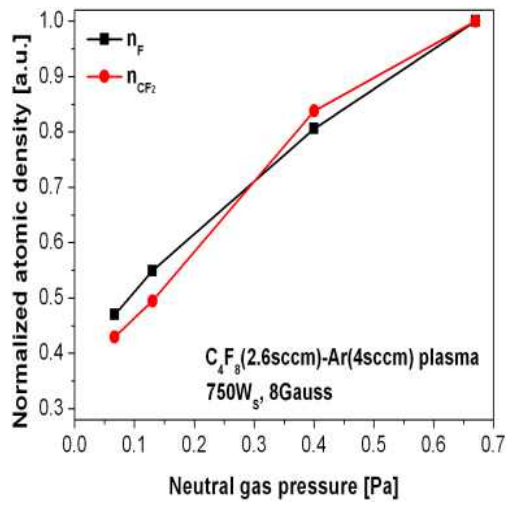


(a)

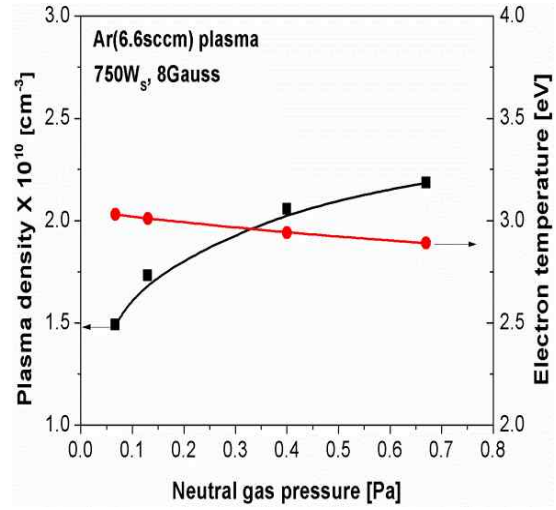


(b)

그림 4.2.18 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

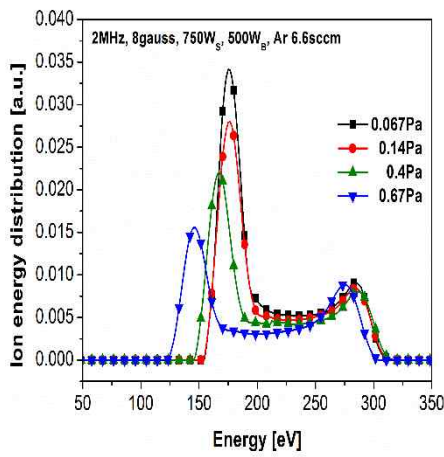


(a)

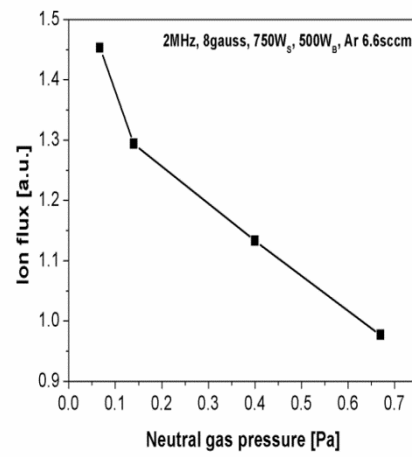


(b)

그림 4.2.19 Neutral gas pressure 에 따른 (a) Normalized atomic density,  
(b) 플라스마 밀도 및 전자 온도



(a)



(b)

그림 4.2.20 Neutral gas pressure 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

#### 4.2.5 Bias power 의 영향

4.2.5 절에서는 bias power 의 변화가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보하고자 한다. 이를 위한 방전 조건을 gas pressure 는 0.067Pa (0.5mT), source power (27.12MHz) 는 750W<sub>S</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 은 2.6sccm, Ar 은 4sccm, B<sub>substrate</sub> 은 8Gauss 로 고정한 상태에서 bias power (2MHz) 를 400, 500, 600, 700W<sub>B</sub> 로 조절하면서 식각을 진행하였다. 그리고 Top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.21 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.22 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 인가된 bias power 의 크기가 400W<sub>B</sub> 인 경우, bowing 현상이 두드러지고 top CD 가 식각 전후로 다소 벌어져 있었다. 그에 비해 인가된 bias power 의 크기가 500, 600, 700W<sub>B</sub> 일 때 bowing CD 가 상대적으로 작았으며 각 경우 간의 top, bowing CD 의 차이가 매우 근소하다. 또한 etch stop 없이 바닥면까지 곧게 식각이 진행되었다.

한편 ACL, oxide layer 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 그림 4.2.23 에 나타나 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 ACL 의 경우 bias power 가 증가함에 따라 etch rate 가 계속 증가하는 반면, oxide 의 경우 600W<sub>B</sub> 까지는 bias power 가 증가함에 따라 etch rate 이 증가하다가 그 이후 오히려 감소하는데 이는 bias power 가 지나치게 높을 경우 발생하는 differential charging 에 기인한 것으로 생각된다[59]. 실제로 그림 4.2.25 를 보면 bias power 가 증가함에 따라 ion 의 energy 가 높아질 뿐만 아니라 ion flux 가 지속적으로 증가하고 있는데, 이로 인해 600W<sub>B</sub> 까지는 oxide etch rate 가 증가하더라도 700W<sub>B</sub> 에서는 ion flux 가 높아서 오히려 뒤이어 입사하는 ion 이 바닥면에 도달하지 못할 가능성이 많을 것으로 보인다. Oxide-to-ACL selectivity 의 경우 bias power 에 따른 oxide etch rate

의 변동폭이 ACL etch rate 대비 훨씬 크기 때문에 oxide etch rate 의 경향성을 그대로 따르고 있다. 결과적으로  $600W_B$  의 bias power 를 인가하였을 때 Oxide-to-ACL selectivity 가 가장 높은 것으로 확인되었다.

그림 4.2.24(a) 은 인가된 bias power 의 크기가 400, 500, 600,  $700W_B$  일 때 HARC pattern 의 top CD 에 따른 normalized etch depth 를 측정한 결과이다. RIE lag 역시 상기의 이유로 인하여 oxide etch rate 와 비슷한 경향성을 보여주고 있는 것으로 생각된다. 결과적으로는 bias power 의 크기가  $600W_B$  일 때 RIE lag 가 약 6% 정도까지 개선되었다. 반면,  $400W_B$  의 경우 ion energy 가 낮아 ion 의 directionality 가 감소하면서 top, bowing CD 가 다른 경우에 비해 증가함과 동시에 ion flux 도 낮아 oxide etch rate 가 상대적으로 작고 RIE lag 도 심한 것으로 보인다.

종합적으로 보았을 때, bias power 증가로 인한 ion energy 및 ion flux 증가 효과를 적절히 활용하면 oxide etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 를 높일 수 있음은 물론 RIE lag 개선에 도움이 되는 것으로 나타났다.

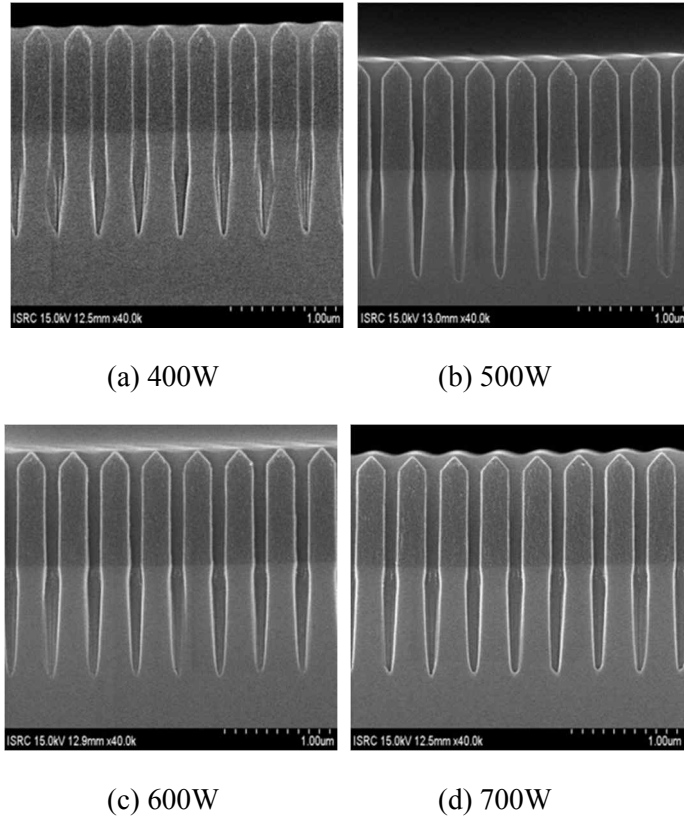


그림 4.2.21 Bias power 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

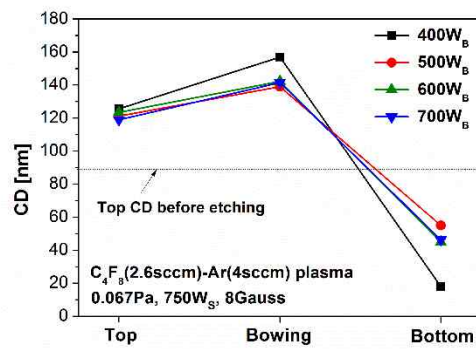
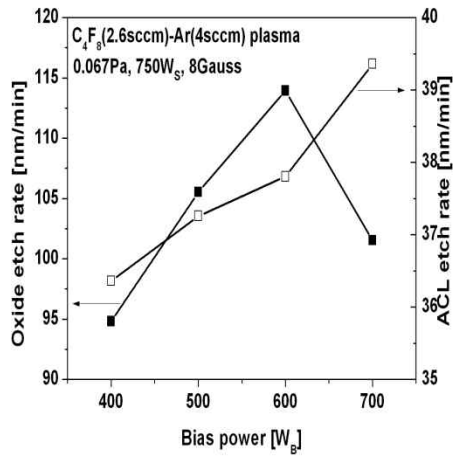
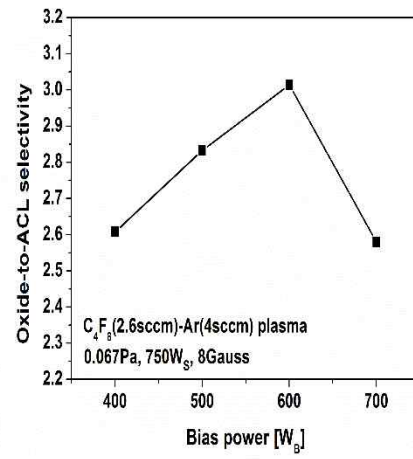


그림 4.2.22 Bias power 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

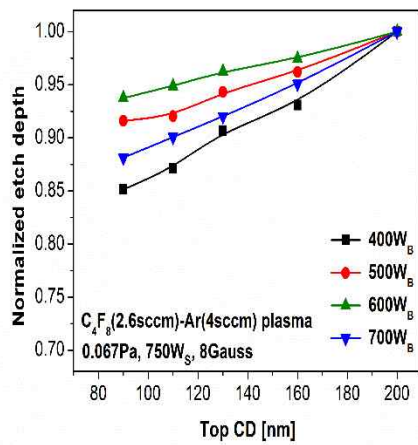


(a)

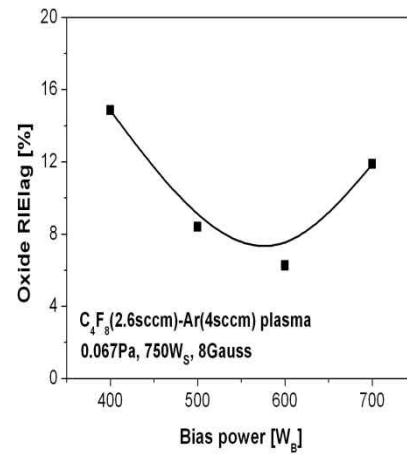


(b)

그림 4.2.23 Bias power 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

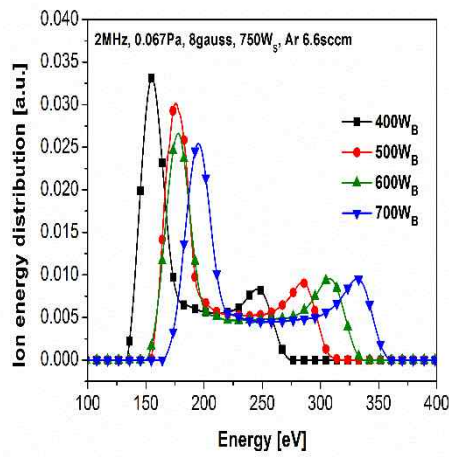


(a)

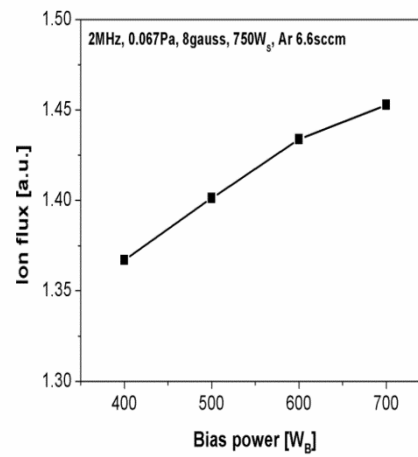


(b)

그림 4.2.24 Bias power 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag



(a)



(b)

그림 4.2.25 Bias power 에 따른 (a) IED, (b) ion flux



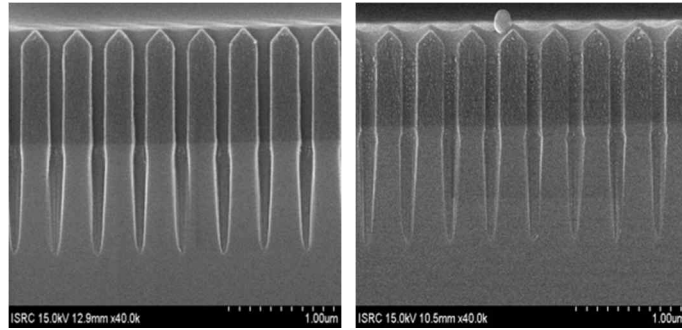
#### 4.2.6 Source power 의 영향

4.2.6 절에서는 source power 의 변화가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다. 이를 위한 방전 조건을 gas pressure 는 0.067Pa (0.5mT), bias power (2MHz) 는 600W<sub>B</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 은 2.6sccm, Ar 은 4sccm, B<sub>substrate</sub> 은 8Gauss 로 고정한 상태에서 source power (27.12MHz) 를 750, 1000, 1250, 1500W<sub>S</sub> 로 조절하면서 etching 을 진행하였다. 그리고 Top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.26 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.27 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 인가된 source power 가 증가할수록 top, bowing CD 가 식각 후 많이 벌어지고 있음을 확인할 수 있다.

한편 ACL, oxide layer 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 그림 4.2.28 에 나타나 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 oxide etch rate 이 source power 가 1250W<sub>S</sub> 까지 증가할 때 같이 증가하다가 그 이후 큰 폭으로 감소하였다. 반면 Oxide-to-ACL selectivity 의 경우 source power 가 증가함에 따라 감소하는데 이는 source power 에 따른 oxide etch rate 증가율이 ACL etch rate 증가율 대비 낮을 뿐더러 1500W<sub>S</sub> 조건에서 oxide etch rate 이 급격하게 떨어지기 때문이다. 그런데 이러한 oxide etch rate 의 경향성은 그림 4.2.30 및 그림 4.2.31(b) 에서 보여주고 있는 F density, plasma density 및 ion flux 의 경향성과는 사뭇 다르다. 이는 그림 4.2.31(a) 와 같이 source power 가 증가할수록 IED 의 오른쪽 peak 가 낮은 energy 영역으로 이동하여 1250W<sub>S</sub> 혹은 1500W<sub>S</sub> 조건에서 ion 의 directionality 가 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 1250W<sub>S</sub> 및 1500W<sub>S</sub> 조건에서 식각 전후로 top CD 및 bowing CD 가 증가하는 것도 이와 비슷한 맥락에서 이해될 수 있다.

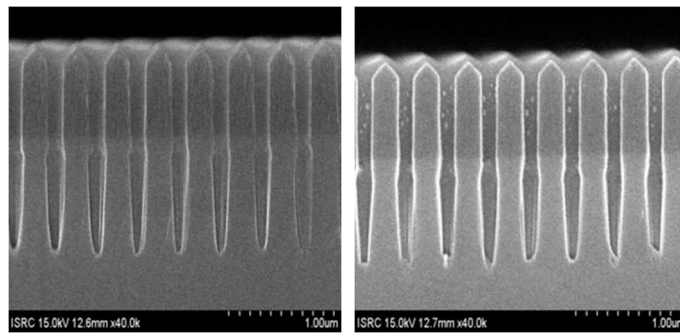
그림 4.2.29 에는 source power 에 따른 normalized etch depth 및 RIE lag 가 나타

나 있다.  $750W_S$  와  $1000W_S$  조건에서의 RIE lag 는 차이가 거의 없는 반면, source power 가  $1250W_S$ ,  $1500W_S$  로 증가하면서 RIE lag 가 증가하고 있다. 이러한 이유 역시 source power 증가에 따른 ion energy 감소로 ion 이 바닥면에 도달하지 못했기 때문인 것으로 보인다.



(a) 750W<sub>S</sub>

(b) 1000W<sub>S</sub>



(c) 1250W<sub>S</sub>

(d) 1500W<sub>S</sub>

그림 4.2.26 Source power 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

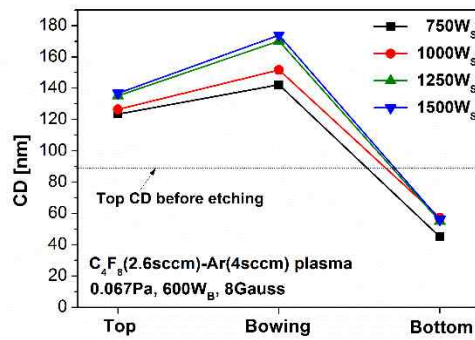
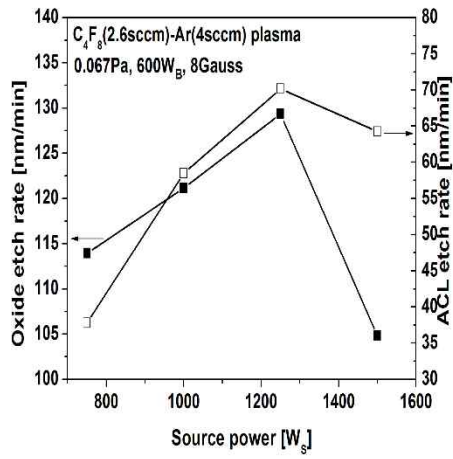
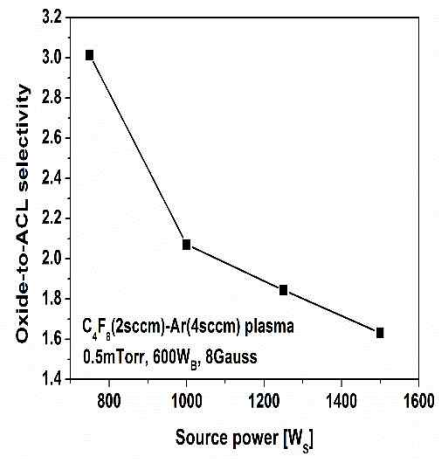


그림 4.2.27 Source power 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD

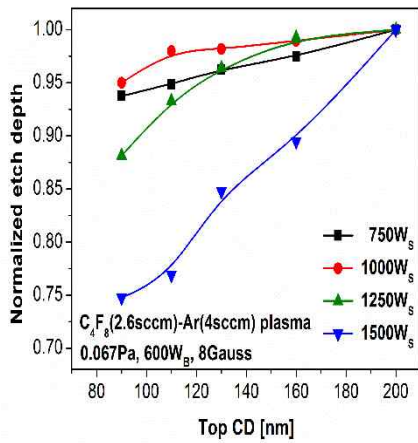


(a)

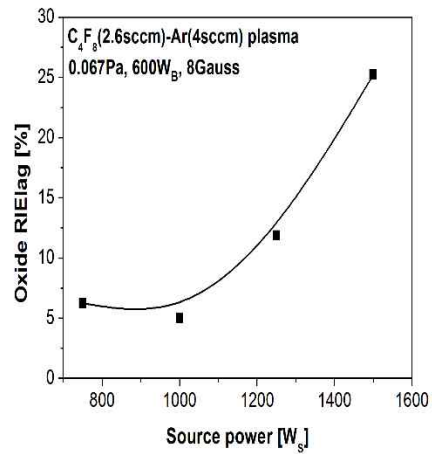


(b)

그림 4.2.28 Source power 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity

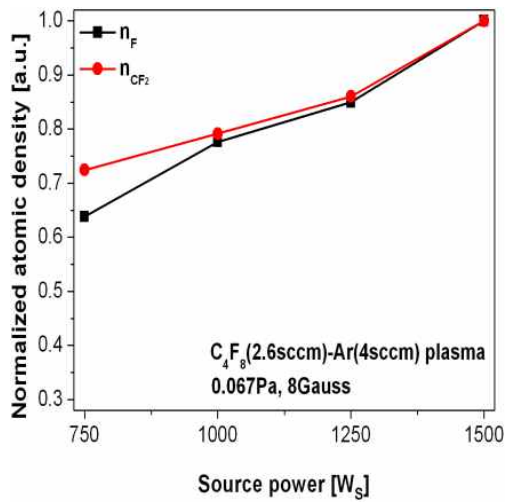


(a)

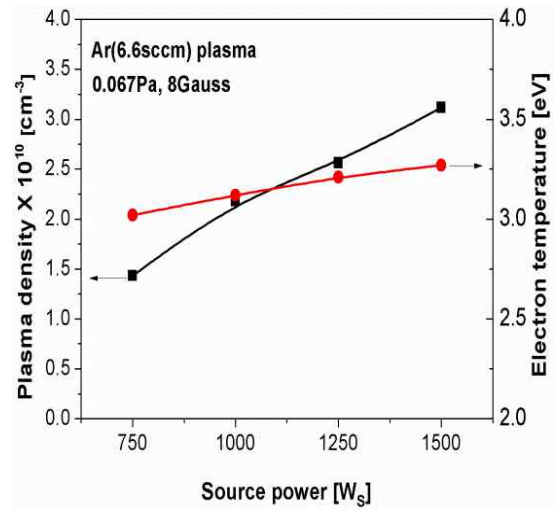


(b)

그림 4.2.29 Source power 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

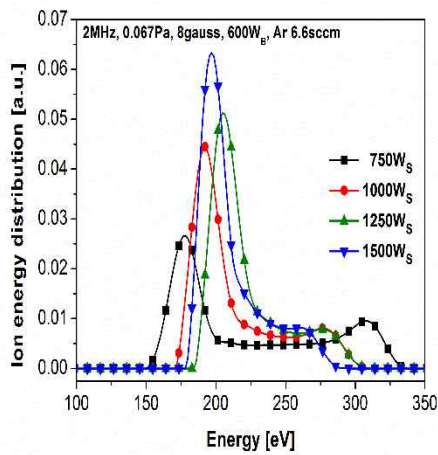


(a)

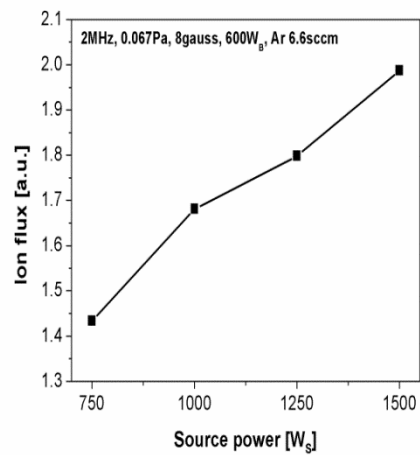


(b)

그림 4.2.30 Source power 에 따른 (a) Normalized atomic density,  
(b) 플라스마 밀도 및 전자 온도



(a)



(b)

그림 4.2.31 Source power 에 따른 (a) IED, (b) ion flux

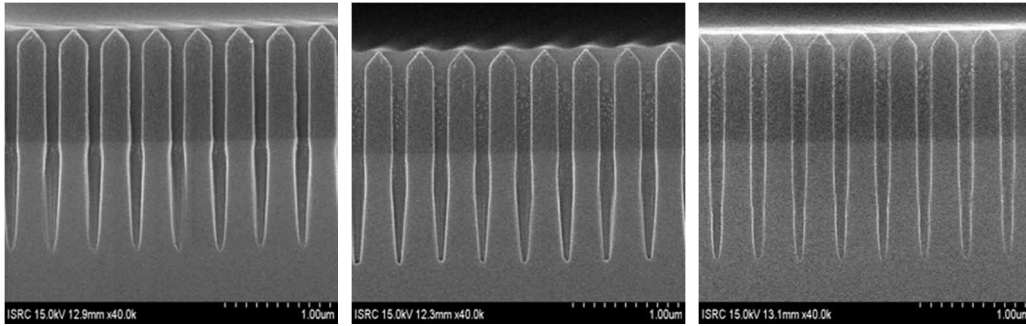
#### 4.2.7 Gas ratio 의 영향

4.2.7 절에서는 Gas ratio 의 변화가 RIE lag 특성에 미치는 영향에 대해 알아보하고자 한다. 이를 위한 방전 조건을 gas pressure 는 0.067Pa (0.5mT), source power (27.12MHz) 는 750W<sub>S</sub>, bias power (2MHz) 는 600W<sub>B</sub>, B<sub>substrate</sub> 은 8Gauss 로 고정한 상태에서 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 의 flow rate 를 2.6sccm, 3.9sccm, 5.2sccm 으로 조절하면서 식각을 진행하였다. 이 때, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 과 Ar 의 총량은 6.6sccm 으로 일정하게 유지하였다. 그리고 Top CD 가 90nm 인 pattern 의 etch depth target 이 900nm 가 되도록 식각한 샘플의 profile 측정 결과가 그림 4.2.32 에 나타나 있다. 이를 그림 4.2.33 에 나타나 있는 각 profile 별 top, bowing, bottom CD 와 결부시켜 관찰해 보면 세 종류의 샘플에서 측정된 top CD 는 거의 유사하게 나타난 반면 bowing CD 의 경우, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 을 5.2sccm 흘린 샘플이 다른 두 종류의 샘플 대비 작은 것으로 나타났다. 이는 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 함량이 증가하면서 그림 4.2.36 와 같이 polymer-rich 한 환경이 구성됨과 동시에 Ar 함량 감소로 인한 physical sputtering 의 감소로 sidewall 에 polymer passivation 이 발생하였기 때문인 것으로 생각된다.

한편 ACL, oxide layer 의 etch rate 및 Oxide-to-ACL selectivity 가 그림 4.2.34 에 나타나 있다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 의 flow rate 가 증가함에 따라 oxide etch rate 가 증가하고 있지만 그 증가율이 낮다. 이는 그림 4.2.36 와 같이 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 의 flow rate 가 증가함에 따라 F 의 atomic density 가 증가하지만, Ar 의 플라즈마 밀도가 상대적으로 감소하면서 Ar 에 의한 physical sputtering 이 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다. Oxide-to-ACL selectivity 의 경우, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 의 flow rate 가 감소함에 따라 증가하는데, 이는 oxide etch rate 증가율이 크지 않은 반면, ACL etch rate 가 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 의 flow rate 이 2.6sccm 에서 3.9sccm 으로 증가할 때 큰

폭으로 상승했기 때문이다.

RIE lag 의 경우 그림 4.2.35 에 나타난 바와 같이 gas ratio 에 따른 뚜렷한 경향성을 보이진 않았지만,  $C_4F_8$  의 flow rate 을 더욱 늘릴 경우 바닥면에 과도한 양의 polymer 가 증착되어 etch stop 이 발생하여 RIE lag 가 악화될 것으로 예상된다. 그러나  $C_4F_8$  의 flow rate 을 5.2sccm 이상으로 늘리게 되면 total flow rate 이 6.6sccm 으로 일정하다 할지라도 0.067Pa 의 낮은 압력을 유지할 수 없어 추가적인 실험은 진행하지 않았다.



(a)  $C_4F_8$  2.6sccm      (b)  $C_4F_8$  3.9sccm      (c)  $C_4F_8$  5.2sccm

그림 4.2.32 Gas ratio 변화에 따른 HARC (Top CD : 90nm) profile

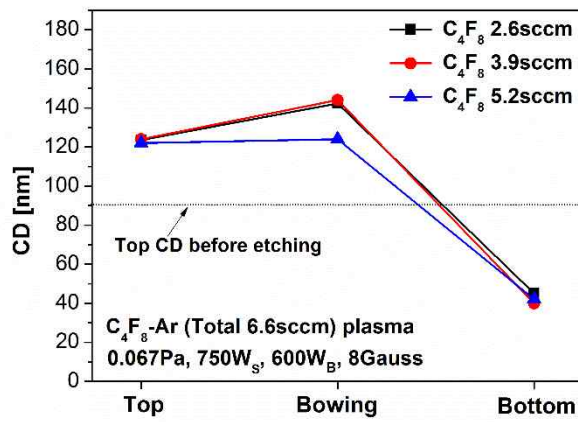
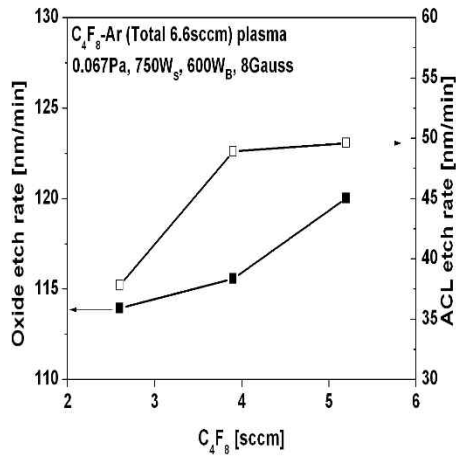
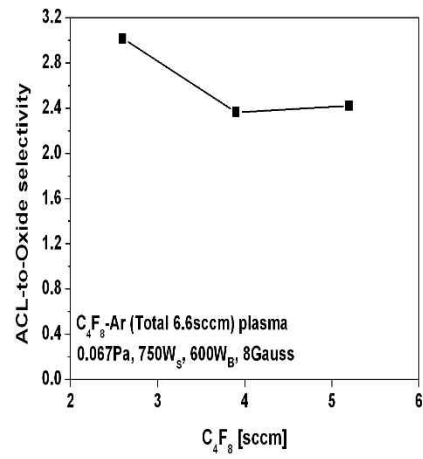


그림 4.2.33 Gas ratio 변화에 따른 HARC 의 top, bowing, bottom CD



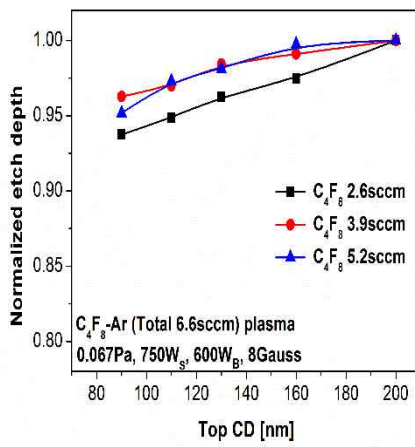


(a)

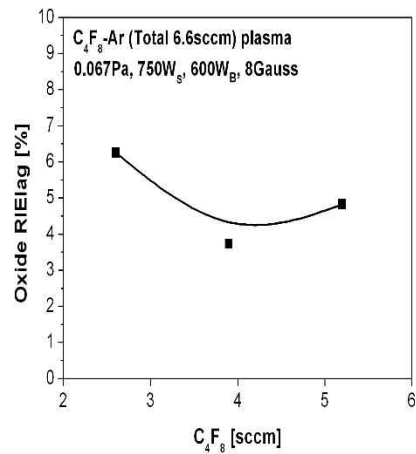


(b)

그림 4.2.34 Gas ratio 에 따른 (a) Etch rate, (b) Oxide-to-ACL selectivity



(a)



(b)

그림 4.2.35 Gas ratio 에 따른 (a) Normalized etch depth, (b) RIE lag

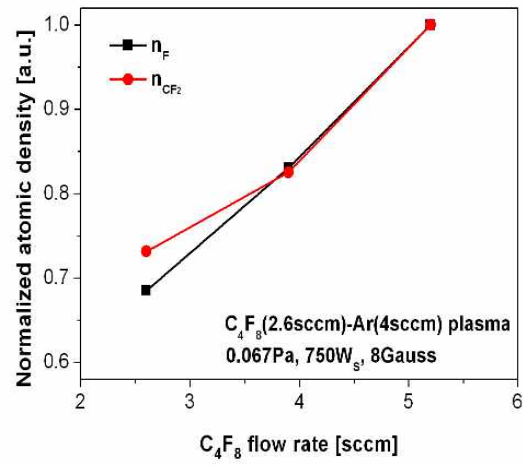


그림 4.2.36 gas ratio 에 따른 Normalized atomic density

### 4.3 요약 및 향후 과제

제 4장에서는 최적으로 구성된 M-ICP case 7 의 환경에서 산화물 기반의 HARC 를 식각 했을 때 나타나는 여러 가지 특성들을 다양한 process parameter 와 연계하여 살펴보았다. 기본적으로는 ACL 및 oxide 의 etch rate 과 Oxide-to-ACL selectivity 특성을 관찰함과 동시에, 식각 전후의 profile 의 변화를 살펴 보았다. 이와 더불어 기존의 CCP, ICP 장치 등의 다양한 장치에서 관찰된 바 있는 RIE lag 특성이 M-ICP 장치에서는 어떠한 방식으로 나타나는지를 자세히 연구 해 보았다. 특히 bias frequency, magnetic flux density, neutral gas pressure, bias power, source power, gas ratio 등의 process parameter 와 RIE lag 의 상관 관계에 대해 집중적으로 조명하였다.

위와 관련하여 가장 먼저 bias frequency 변화에 따른 HARC 의 식각 특성을 살펴 보았다. 그 결과 bias frequency 가 2MHz 일 때, 13.56MHz 대비 ion energy 및 ion flux 가 증가하여 oxide etch rate 이 증가함은 물론 식각 전후의 top CD, bowing CD 변화폭이 상대적으로 적어 profile 왜곡이 줄어드는 모습을 관찰할 수 있었다. 이후, bias frequency 를 2MHz 로 선택하여 magnetic flux density 변화에 따른 HARC 의 식각 특성을 살펴 보았다. Magnetic flux density 가 증가할 경우 oxide 식각에 기여하는 F 의 atomic density 및 ion flux 가 증가하는 효과를 얻을 수 있었지만 magnetic flux density 가 지나치게 클 경우 ion energy 가 감소하여 오히려 oxide etch rate 이 떨어지고 RIE lag 특성이 악화되는 현상을 관찰하였다. 하지만 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 가 적당할 경우 RIE lag 특성이 개선됨은 물론 (8Gauss) oxide etch rate 이 ICP 대비 3배 이상 증가하고 (8Gauss) Oxide-to-ACL selectivity 는 최대 44% 향상되었다 (4Gauss).

그 다음, magnetic flux density 를 8Gauss 로 고정한 상태에서 neutral gas pressure

변화에 따른 HARC 의 식각 특성을 살펴 보았다. 실험 결과 0.4Pa 이상의 높은 압력에서 식각을 진행하게되면 oxide etch rate 는 어느 정도 높아질 수 있으나 낮은 ion energy 및 낮은 ion flux 로 인한 profile 왜곡이나 etch stop 의 가능성이 있을 수 있는 반면, M-ICP 장치의 장점을 활용하여 0.067Pa 이라는 극도로 낮은 압력 하에서 식각을 진행하면 oxide etch rate 의 큰 감소 없이 vertical profile 을 형성할 수 있음은 물론, 높은 ion flux 로 인해 RIE lag 도 10% 미만으로 줄어드는 효과를 얻을 수 있었다. 특이한 점이 있다면 M-ICP 장치의 경우 압력이 높고 polymer-rich 한 환경에서는 inverse RIE lag 특성을 보인 반면, 압력이 낮고 polymer-poor 한 환경에서는 normal RIE lag 특성을 보였는데 압력 변화의 범위가 그다지 넓지 않은 상황에서 이와 같은 상반된 특성을 보인 사례는 보고된 바가 거의 없다.

한편, 압력을 0.067Pa 로 고정한 상태에서 bias power 변화에 따른 HARC 의 식각 특성도 자세히 살펴 보았다. Bias power 가 증가하면 ion energy 및 ion flux 가 증가하여 oxide etch rate 이 커지고 RIE lag 가 개선되어 600W<sub>B</sub> 에서는 RIE lag 가 약 6% 정도까지 개선될 수 있었지만 그 이상으로 power 가 증가하게 되면 지나치게 많은 ion flux 로 인한 differential charging 으로 뒤이어 입사하는 ion 이 바닥에 도달하지 못하기 때문에 오히려 oxide etch rate 이 감소함은 물론 RIE lag 가 다시 악화되는 현상을 관찰할 수 있었다. Oxide-to-ACL selectivity 는 oxide etch rate 의 경향성을 그대로 따랐으며 역시 600W<sub>B</sub> 조건에서 그 값이 가장 높았다. 그리고 bias power 를 600W<sub>B</sub> 로 고정한 상태에서 source power 변화에 따른 HARC 특성을 살펴 보았는데, source power 가 증가할수록 F 의 atomic density, plasma density 및 ion flux 가 증가하여 oxide etch rate 이 증가하지만 지나치게 power 가 높아지면 ion energy 가 감소하여 sidewall 로 입사하는 ion 의 양이 늘어나 oxide etch rate 이 오히려 큰 폭으로 감소함은 물론 top CD, bowing CD

가 증가하는 등의 profile 왜곡이 발생함을 확인할 수 있었다. 마지막으로, source power 를  $750W_S$  로 고정한 상태에서 gas ratio 의 변화에 따른 HARC 의 식각 특성을 살펴 보았다.  $C_4F_8$  의 flow rate 을 늘렸을 때,  $CF_2$  density 는 증가하는 반면 physical sputtering 을 유발하는 Ar 의 함량은 감소하기 때문에 결과적으로 polymer passivation 이 발생하여 bowing CD 가 큰 폭으로 감소한 profile 을 얻을 수 있었다. 또한  $C_4F_8$  의 flow rate 이 증가하면 F density 도 증가하여 oxide etch rate 이 증가하지만 증가율이 그리 높지는 않았는데, 이는 Ar 에 의한 physical sputtering 이 감소했기 때문인 것으로 보인다. 비록 RIE lag 와 gas ratio 간의 뚜렷한 상관 관계는 발견할 수 없었지만 전반적인 실험 결과를 살펴 보았을 때, 최적화된 M-ICP 장치 구성을 통하여 산화물 기반 HARC 의 etch rate 을 ICP 대비 큰 폭으로 향상시킬 수 있음은 물론 M-ICP 장치가 RIE lag control 의 측면에서도 용이하다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 bias power 이외에도 substrate 에 인가되는 magnetic flux density 및 M-ICP 장치이기에 가능한  $0.067Pa$  의 매우 낮은 neutral gas pressure 가 RIE lag 를 제어할 수 있는 매우 결정적인 process parameter 가 될 수 있음을 알 수 있었다.

이로써 3 장에서는 M-ICP 장치가 대면적 공정에 적용하기 용이함을 확인할 수 있었다면 4 장에서는 M-ICP 장치의 공정 제어에 대한 자유도가 다른 식각 장치에 비해 매우 높다는 사실을 확인하였다. 이는 미세 pattern 을 식각함에 있어서 중요한 이슈로 부각되고 있는 RIE lag 와 process parameter 의 상관 관계가 선행 연구를 통해 어느 정도 알려진 바 있었으나 기존의 식각 장치에서는 이를 올바르게 제어하는 것이 어려웠던 반면 본 M-ICP 장치는 전자석을 활용한 자기장의 세기 조절을 통하여, 그리고 압력이 감소함에 따라 ion flux 가 증가하는 고유의 특징을 활용하여 RIE lag 를 보다 효과적으로 제어할 수 있기 때문이다.

4 장을 통해 확인할 수 있었던 또 하나의 중요한 사실은 CCP 장치는 ion

energy 가 높지만 플라즈마 밀도가 낮아 물리적 식각 장치로서 용도가 한정되어 있고 ICP 장치는 플라즈마 밀도가 높지만 ion energy 가 낮아 poly etcher 로서 용도가 한정되어 있는 것과는 달리 M-ICP 장치는 poly etcher 뿐 아니라 높은 ion flux 에 기반한 물리적 식각 장치로서도 활용의 폭을 넓혀나갈 수 있다는 것이다. 다만 현재 물리적 식각 장치로서 주로 활용되고 있는 CCP (혹은 VHF CCP) 장치 대비 M-ICP 장치의 전자 온도가 높기 때문에 향후 펄스 플라즈마를 적용하는 방법 등을 통해 공정 중 M-ICP 장치의 전자 온도를 낮출 수 있는 연구들을 추가로 진행할 필요가 있다.

## 제 5 장 결 론

반도체의 집적도가 증가하고 생산성 향상을 위한 대면적 wafer 공정의 필요성이 대두됨에 따라 미세 pattern 을 형성하는 건식 식각 공정은 이전에 겪지 못한 여러 가지 기술적인 난관에 봉착해 있다. 이에 본 논문에서는 M-ICP 장치를 설계 및 구성한 뒤 장치의 대면적 공정 및 공정 제어 능력에 대한 실험적인 입증을 통해 이를 차세대 건식 식각 장치로서 활용할 수 있는지 살펴보았다.

먼저 대면적의 플라즈마를 균일하게 생성하기 위해 process chamber 내 자기장의 공간 분포를 제어할 수 있는 M-ICP 장치를 구성해 보았다. 자기장의 발생 수단으로는 전자석을 이용하였으며 process chamber 의 구조를 고려하여 이를 matching box 하단부, RF window 하단부, substrate 근처, Turbo Molecular Pump 근처 등 4 곳에 설치하였다. 다만 플라즈마 밀도 및 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도 관점에서 최적화된 자기장의 공간 분포가 어떠한 방식으로 형성되어야 하는지에 대한 연구가 이루어진 바 없기 때문에 matching box 하단부에 3개, RF window 하단부 및 substrate 근처에 1개씩 그리고 Turbo Molecular Pump 근처에 2개 등 총 7 개의 전자석을 설치하여 각 전자석에 인가되는 전류의 세기 및 전류의 인가 방향 등을 조절함으로써 다양한 분포를 가지는 자기장을 형성할 수 있도록 하였다.

이론적인 측면에서 고찰해 보면 substrate 중심으로부터 반경 방향 및 수직축 방향으로 자기장의 세기가 증가해야 건식 식각 환경에 보다 유리한 환경이 조성될 수 있다. 먼저 반경 방향의 자기장 분포를 고려해 보면, 플라즈마 밀도는 반경 방향으로의 확산으로 인한 손실이 발생하면서 density gradient 가 감소하는데 만약 반경 방향으로의 자기장의 세기도 감소한다면 flute instability 혹은 interchange instability 현상이 발생할 수 있다. 따라서 substrate 중심으로부터 반

경 방향으로 거리가 증가할수록 자기장의 세기가 증가해야 이와 같은 현상이 발생하지 않고 플라즈마 밀도의 균일도를 올바르게 제어할 수 있다. 또한 축 방향의 자기장 분포를 고려해 보면, 자기장의 인가를 통해 R-wave 가 process chamber 내부로 전파하기 위해서는  $\omega < \omega_{ce}$  인 조건을 만족해야 하는데 축 방향의 자기장의 세기가 증가하면 이 조건이 항상 성립하여 R-wave 가 전파할 수 있으며 magnetic mirroring 혹은 magnetic trap 을 통한 plasma confinement 를 위해서라도 축 방향의 자기장의 세기가 증가하는 것이 바람직하다.

상기와 같은 이론적 배경에 착안하여 본 논문에서는 복수의 전자석을 효과적으로 제어하여 substrate 중심으로부터 반경 방향 혹은 수직축 방향으로의 자기장의 분포를 다양하게 구성하였다. 그리고 DLP 를 활용하여 자기장의 공간 분포에 따른 플라즈마 밀도, 전자 온도 및 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도를 측정한 결과 실제로 반경 방향과 수직축 방향으로 자기장의 세기가 증가했을 때 플라즈마 밀도가 높았고 반경 방향에 대한 플라즈마 밀도의 균일도도 우수했다. 또한 자기장의 공간 분포가 최적화된 환경 하에서 neutral gas pressure 및 substrate 의 magnetic flux density 에 따른 플라즈마 밀도와 전자 온도의 공간 분포를 자세히 측정한 결과, M-ICP 의 플라즈마 밀도가 ICP 의 플라즈마 밀도 대비 최대 10배 이상 향상됨을 확인할 수 있었다. 전자 온도의 경우, M-ICP 장치에서는 R-wave 의 전파로 인해 RF window 로부터 멀리 떨어져 있는 전자에도 energy 가 전달되면서 ICP 장치 대비 공간에 분포하는 전자의 온도가 높았다. 전자 온도가 증가할 경우 식각 가스 내 parent molecule 로부터 식각에 필요한 radical 이 많이 해리 (dissociation) 되기 때문에 etch rate 가 증가할 수 있지만 전자 온도가 지나치게 높을 경우, mask 상단부의 electron charging 으로 인한 ion deflection 으로 profile 이 왜곡되는 문제가 발생할 수 있다. 실제로 본 실험의 경우, substrate 의 magnetic flux density 가 너무 높으면 substrate 근처에서도



electron heating 이 발생하여 etch rate 는 증가하더라도 ion deflection 이 발생할 수 있는데 substrate 의 magnetic flux density 가 높지 않을 때 공간상의 전자 온도는 ICP 보다 높더라도 electron heating 이 발생하지 않는 substrate 근처에서는 M-ICP 장치의 전자 온도가 ICP 장치와 거의 유사하였다. 즉, 식각에 기여하는 radical 의 생성은 촉진하면서도 profile 왜곡을 억제하기 위해서는 substrate 의 magnetic flux density 를 적정 수준으로 유지하는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다. 향후 플라즈마 밀도의 균일도와 전자 온도 뿐만 아니라 substrate 중심으로부터 반경 방향에 따른 IED, EEPF, radical flux 의 분포들도 종합적으로 살펴볼 필요가 있으나 대면적 플라즈마를 균일하게 형성함에 있어 기술적인 한계점을 보이고 있는 다른 식각 장치와 달리 M-ICP 장치는 자기장의 공간 분포를 조절하는 간단한 방법으로 플라즈마 밀도의 균일도를 향상시킬 수 있어 대면적 공정이 가능한 차세대 건식 식각 장치로 충분히 활용할 수 있다.

한편, 대면적 공정의 관점에서 최적화된 M-ICP 장치의 공정 제어 능력을 살펴 보기 위해 top CD 가 최소 90nm 에서 최대 200nm 에 이르는 산화물 기반의 HARC 를 활용한 식각 실험을 진행해 보았다. 특히 ACL 및 oxide etch rate, Oxide-to-ACL selectivity 그리고 식각 전후의 profile 변화 등을 자세히 살펴 보았다. M-ICP 장치에서 자기장의 인가를 통해 oxide 의 etch rate 과 ACL-to-Oxide selectivity 를 개선할 수 있음은 선행 연구를 통해 알려진 바 있으며 본 연구에서도 미세 pattern 식각 실험을 통해 이를 재확인하였다. 그러나 미세 pattern 을 식각하면서 발생할 수 있는 RIE lag 를 제어하는 능력도 차세대 식각 장치로서 갖추어야 할 필수 조건 중의 하나인데 M-ICP 장치에서 나타나는 RIE lag 현상이나 그 메커니즘 등에 대해 제대로 연구가 이루어진 바 없다. 따라서 본 논문에서는 bias frequency, magnetic flux density, neutral gas pressure, bias power, source power 그리고 gas mixture ratio 등의 process parameter 와 RIE lag 의 상관 관계에

대해 집중적으로 조명하였다. 그 결과, M-ICP 장치에서는 magnetic flux density 와 neutral gas pressure 가 RIE lag 를 제어하는 결정적인 process parameter 가 될 수 있음을 확인하였다. 먼저 magnetic flux density 의 변화에 따른 RIE lag 특성을 보았을 때, ICP 에 자기장을 인가하면 ion flux 및 F 의 atomic density 가 증가함에 따라 etch rate 이 향상됨은 물론 RIE lag 가 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 물론 magnetic flux density 가 지나치게 강하면 ion energy 가 감소함으로 인해 ion 이 방향성을 상실하고 바닥면에 도달하지 못하여 etch rate 이 다시 감소하고 RIE lag 가 심화되는 특성을 보이기도 하였지만 본 실험에서는 substrate 의 magnetic flux density 가 0gauss 에서 8gauss 까지 증가할 경우 oxide etch rate 은 증가하고 RIE lag 가 개선되는 효과를 확인할 수 있었다. 또한 ICP 장치와 달리 M-ICP 장치에서는 inverse RIE lag 현상이 관찰되었는데 이는 A-OES 분석 결과 M-ICP 장치에서 상대적으로 polymer-rich 한 환경이 조성되기 때문인 것으로 나타났다.

다음 neutral gas pressure 의 변화에 따른 RIE lag 특성을 보았을 때, gas pressure 가 낮아질수록 RIE lag 가 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 neutral gas pressure 가 감소함에 따라 ion energy 및 ion flux 가 증가하는 M-ICP 장치 고유의 특성 때문인데, 본 실험에서 구성한 M-ICP 장치는 최소 0.067Pa (0.5mT) 의 매우 낮은 압력에서도 HARC 의 식각이 가능하였으며 RIE lag 는 6% 미만까지 개선되었다. 또한 neutral gas pressure 가 0.4Pa (3mT) 이상일 경우 inverse RIE lag 특성이 나타났는데 이 역시 A-OES 분석 결과를 살펴 보았을 때 neutral gas pressure 가 높은 조건에서 polymer-rich 한 방전 환경이 조성되기 때문인 것으로 나타났다. 본 논문은 M-ICP 장치를 구성하여 CCP, ICP 혹은 ECR plasma etcher 등의 자화된 플라즈마 장치들에서 확인할 수 없었던 magnetic flux density, extremely low neutral gas pressure 와 RIE lag 의 상관 관계를 살펴본 것과 이를 통

해 M-ICP 장치가 대면적 플라즈마를 균일하게 형성하는 능력이 우수할 뿐만 아니라 RIE lag 현상과 같이 공정 중에 발생하는 문제들에 대해서도 효과적으로 통제할 수 있음을 확인한 것에 그 의미를 두고 있다. 비록 CCP (혹은 VHF CCP) 장치 대비 전자 온도가 여전히 높아 펄스 플라즈마를 적용하는 방법 등을 향후 추가적으로 고려해 보아야 하겠지만 용도가 제한적인 기존의 CCP 나 ICP 장치와 달리 M-ICP 장치를 poly etcher 로서, 그리고 물리적 식각 장치로서 폭넓게 활용할 수 있는 가능성도 확인할 수 있었다.

결론적으로, 본 연구를 통해 설계하고 구성한 M-ICP 장치는 대면적 공정이 가능하고 공정 제어 능력이 탁월하여 차세대 건식 식각 장치로서 갖추어야 할 가장 중요한 두 가지 요소를 모두 가지고 있다. 본 연구는 학술적인 측면에서 보았을 때 이전에 살펴본 바 없었던 자기장의 공간 분포에 따른 플라즈마의 밀도 및 균일도 변화나 미세 pattern 을 식각했을 때 발생하는 RIE lag 현상을 심도 있게 관찰하고 이해했다는 것에 1차적인 의의가 있으며 장치 내 공간적인 IED 및 neutral flux 등의 분포 파악이나 물리적 식각 장치로서 전자 온도를 낮출 수 있는 방안 및 그 메커니즘 분석 등 다양하고 흥미로운 future work 를 제시했다는 점에서 2차적인 의의가 있다. 산업적인 측면에서는 450mm 대면적 wafer 공정을 양산에 적용할 수 있는 대안을 제시했다는 점에서 1차적인 의의가 있으며 더 나아가 M-ICP 장치의 연구 개발을 통해 수 십 nm 급 초미세 pattern 식각의 공정 제어 솔루션을 제공하였다는 점에서 2차적인 의의가 있다.

## 부 록 AC PDP 의 구동 및 수명 특성

교류형 플라즈마 표시기 (AC PDP) 는 건식 식각 공정 외에 Glow discharge 에 의해 형성된 플라즈마를 이용하는 또다른 대표적인 분야 중 하나이다. PDP 는 LCD (Liquid Crystal Display), OLED (Organic Light Emitting Diode) 등과 함께 기존 CRT 의 공간적인 제약을 극복할 수 있는 대안으로 제시되어 1900년대 후반부터 꾸준히 연구가 진행되어 왔으며 특히 한국과 일본 기업들의 주도 하에 비약적인 성장을 이루었다. 비록 지금은 LCD 및 OLED TV 의 공격적인 마케팅에 밀려 시장 점유율이 다소 낮아지는 추세에 있지만 제작 방법이 간단할 뿐만 아니라 시야각이 넓고 색재현성이 뛰어나며[78][79] 반응 속도가 빨라 생동감 있는 화면을 구사하는 장점을 가지고 있어 여전히 소비자 선호도가 높다. 뿐만 아니라 최근에는 가정용 디스플레이를 넘어서 옥외 대형 광고판으로 그 활용 범위를 넓혀 나가고 있다[80].

하지만 위와 같은 장점에도 불구하고, PDP 는 방전 효율이 낮아 LCD 나 OLED TV 대비 전력 소모량이 크다는 문제점이 있다. 이와 관련하여 2000년대 초·중반까지는 방전 효율을 높일 수 있는 다양한 구조에 대한 연구[81]-[84]가 이루어진 반면 최근에는 기존 MgO 보호막 대비 2차 전자 방출 계수가 높은 새로운 물질을 보호막으로 적용하여 방전 효율을 개선하는 연구가 이루어지는 추세이다[85]-[89]. 그 중에서도 SrO 는 MgO 와 같은 알칼리 토금속 계열의 산화물 중 electron affinity 및 band-gap energy 가 가장 낮은 물질로 알려져 있다 [90]. 그러나 H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub> 에 대한 용해도가 높기 때문에 공정 과정 중 대기 노출이 불가피한 PDP 에는 적용하는데 어려움이 있었다. 이와 관련하여 K. W. Whang[88] 은 SrO 상부에 MgO 를 얇게 증착하는 방법으로 SrO 의 대기 노출을 억제하고 PDP 의 방전 효율을 기존 대비 최대 3배 이상 향상시키는데 성공

하였다. 다만 이 방법을 적용할 경우 MgO 막을 제거하기 위해 소요되는 aging 시간이 길다는 단점이 제기되기도 하였으나, K. W. Whang[91] 은 SrO 하부에 diffusion barrier 의 역할을 하는 SiO<sub>2</sub> 를 PECVD 로 형성하고 이를 통해 상부 유전체로부터 확산되는 불순물을 차단하여 상, 하판 합착 및 소성 과정에서 방전 표면 상으로 노출되는 SrO 을 보호함으로써 aging 시간을 4시간으로 줄인 연구 결과를 연이어 발표하기도 하였다.

이 밖에도 신 보호막을 적용하여 PDP 의 방전 효율을 개선한 연구 결과는 몇 차례 발표된 바 있지만 신 보호막을 적용한 PDP 의 구동 특성에 대해서는 결과가 보고된 바가 거의 없다. 하지만 3D PDP 가 이미 널리 보급되고 있는 이 시점에서 PDP 의 response time 을 단축시키는 것도 방전 효율 개선 못지 않게 매우 중요한 사안임에 분명하다. 또한 발광 효율이 높고 response time 이 빠르다고 할지라도 패널의 수명이 짧다면 신 보호막의 적용 의미는 퇴색될 수밖에 없다. 따라서 부록에서는 PDP 에 SrO 를 적용하여 방전 효율을 개선한 연구 결과를 되짚어 본 후, 새롭게 설계한 구동 파형을 인가하여 SrO 를 적용한 PDP 의 방전 지연 시간 (address discharge time lag) 을 단축한 연구 결과를 소개하고자 한다. 그리고 3000시간의 패널 방전을 통하여 나타난 MgO PDP 및 SrO PDP 의 수명 특성에 대해 살펴보는 것을 끝으로 부록을 마무리하고자 한다.

## A.1 SrO 의 적용을 통한 AC PDP 의 발광 효율 개선

### A.1.1 패널의 제작 및 실험 방법

그림 A.1.1 및 그림 A.1.2 에는 PDP 의 기본 구조 및 실험에 사용할 테스트 패널의 단면도가 나타나 있다. 그림 A.1.2 의 (a) 는 diffusion barrier 가 적용되기 이전의 모델로 SrO 와 SrO 를 대기 노출로부터 보호하기 위한 MgO 로 구성되어 있다[88]. 그림 A.1.2 의 (b) 는 MgO-SrO 이중 보호막에 diffusion barrier 를 추가함으로써 유전체로부터 보호막으로 확산되는 불순물을 차단하고 패널의 aging 시간을 단축시키는 구조이다[91]. 본 실험에서는 (a) 와 (b) 의 구조를 적용한 테스트 패널이 모두 제작 되었으며 방전 특성은 (b) 의 구조에서 집중적으로 살펴 보았다. 테스트 패널은 7.5인치 크기 (대각선 길이 기준) 로 제작되었으며 cell resolution 은 50인치 Full HD (1920×1080 pixels) 이다. 1개의 cell 을 구성하는 3개의 sub-cell 에는 각각 red, blue, green 형광체를 도포하였으며 상, 하판 합착 후 360°C 의 온도에서 6시간 동안 가열 배기가 진행되었다.

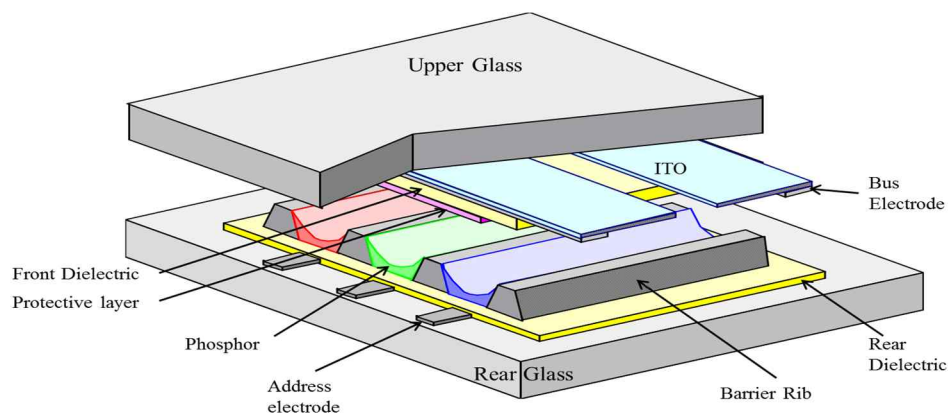


그림 A.1.1 AC PDP 의 기본 구조[92]

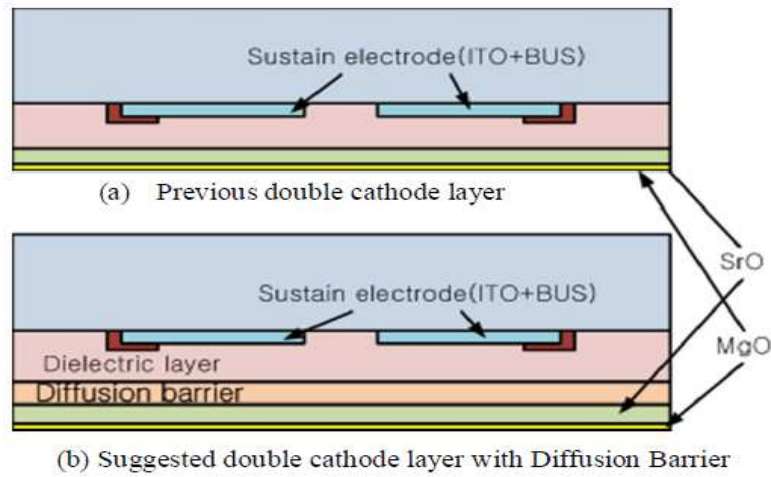


그림 A.1.2 SrO 를 적용한 테스트 패널의 단면도[91]

한편, 가열 배기가 완료된 테스트 패널에는 Ne-Xe 15%, 400torr 의 혼합 가스를 주입한 후 X 전극 (혹은 Common 전극) 과 Y 전극 (혹은 Scan 전극) 에 frequency 10kHz, duty ratio 50%,  $V_{peak} = 250V$  인 파형을 인가하여 aging 을 진행하였다.

A.1.2 절에서는 제작된 테스트 패널이 보여주는 방전 전압, 발광 휘도 그리고 발광 효율 등의 여러 가지 방전 특성을 알아보고자 한다. 다만 앞에서 언급한 바와 같이 A.1.2 절에서 살펴볼 대부분의 내용은 이미 다수의 선행 연구를 통해 결과가 보고된 바 있으며 단지 구동 특성을 연구하기 위해 제작된, size 가 좀 더 큰 테스트 패널에서 SrO 의 적용을 통해 나타나는 효과를 재확인하고 이를 통해 기존의 연구 결과를 되짚어 보는 것임을 명확하게 밝히는 바이다.

### A.1.2 패널의 방전 전압 및 발광 효율

그림 A.1.3 에는 MgO 를 적용한 패널, MgO-SrO 를 적용한 패널 그리고 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널들의 aging 경과 시간에 따른 방전 전압의 변화가 나타나 있다. 우선 SrO 를 적용한 패널의 firing 전압과 sustain 전압이 MgO 를 적용한 기존 패널 대비 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 더욱 중요한 것은 MgO-SrO 를 적용한 패널의 경우 방전 전압을 떨어뜨리기 위해 상당히 긴 aging 시간을 필요로 하는 반면 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널의 경우 불과 4시간 만에 방전 전압이 안정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 A.1.4 와 같이 SiO<sub>2</sub> 를 적용하지 않을 경우 유전체로부터 확산되어 나온 Na 과 같은 불순물이 SrO 에 침투하는 반면 diffusion barrier 의 역할을 하는 SiO<sub>2</sub> 를 적용할 경우 불순물의 확산이 억제되어 소성 후 방전 표면에 드러난 SrO 가 높은 순도를 유지할 수 있기 때문이다.

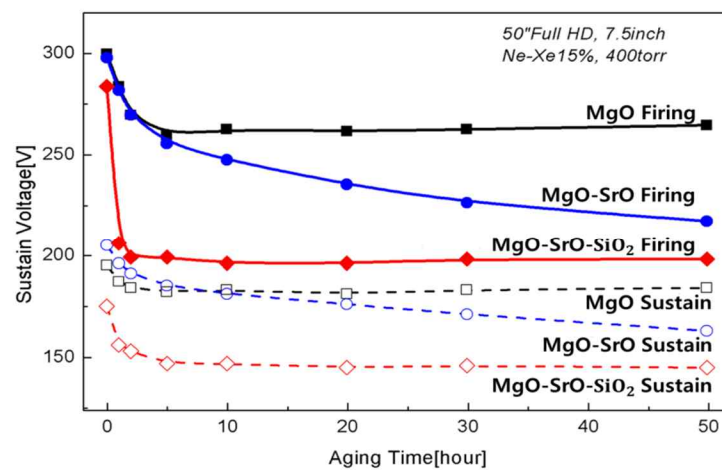


그림 A.1.3 Aging 시간에 따른 테스트 패널의 방전 전압 변화



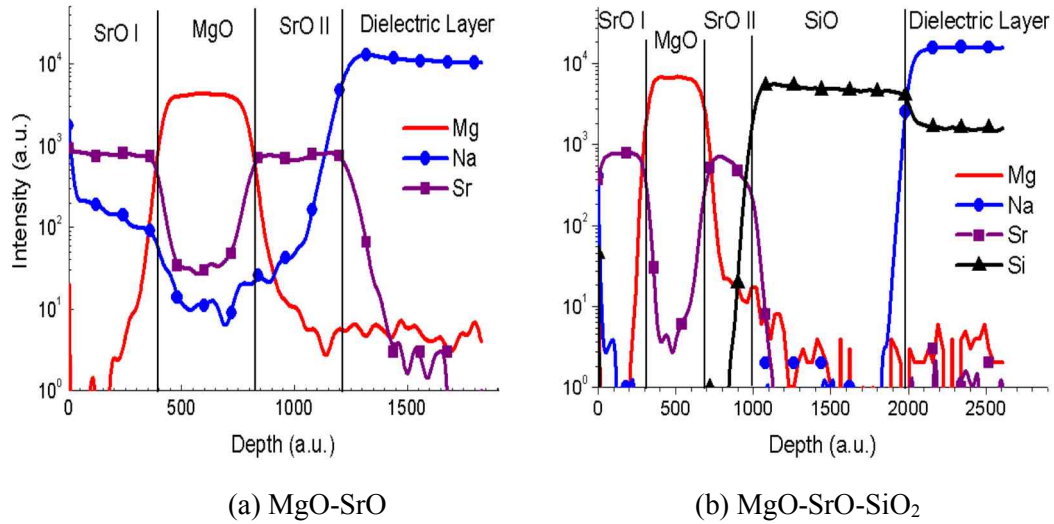
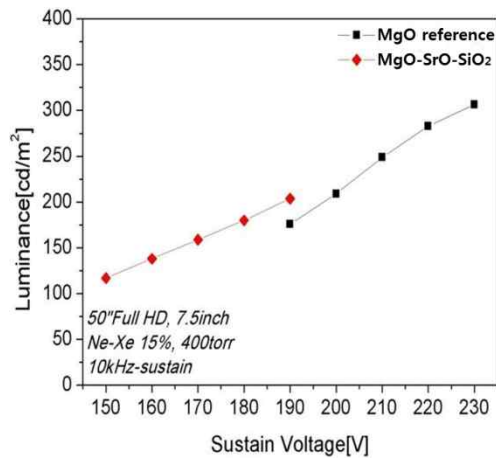
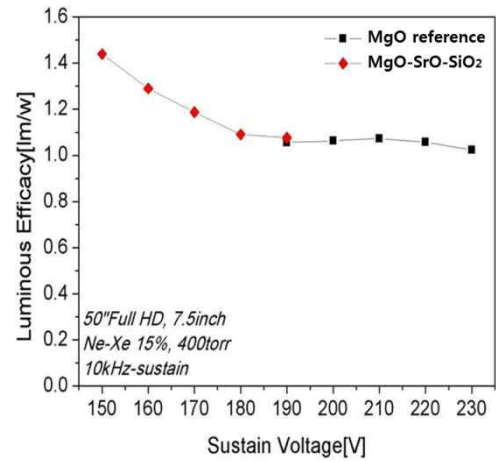


그림 A.1.4 상, 하판 합착 및 소성 후 패널에 대한 TOF-SIMS 분석 결과[91]

그림 A.1.5 에는 10시간 aging 후 측정한 테스트 패널의 발광 휘도 및 발광 효율이 나타나 있다. MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널의 최소 방전 유지 전압이 MgO 를 적용한 패널 대비 40V 가까이 감소하였으며 발광 효율은 최대 40% 정도 향상된 모습을 관찰할 수 있다. 선행 연구와 비교했을 때 테스트 패널의 size 는 커지고 red, green, blue 형광체를 모두 도포하였음에도 여전히 MgO 에 대한 발광 효율의 증가율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 그림 A.1.6 과 그림 A.1.7 에는 MgO 를 적용한 패널과 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널에 흐르는 방전 전류를 측정한 결과가 나타나 있다. 특히 그림을 보면 각 패널의 middle of sustain voltage margin (MgO : 210V, MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> : 170V) 에서 측정했을 때, MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널이 MgO 를 적용한 패널 대비 방전 전류가 적어 그만큼 적은 전력을 소모한다는 것을 확인할 수 있고 같은 sustain voltage (190V) 에서 측정했을 때 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널이 MgO 를 적용한 패널 대비 더 빠른 시간에 방전이 일어남을 알 수 있다.



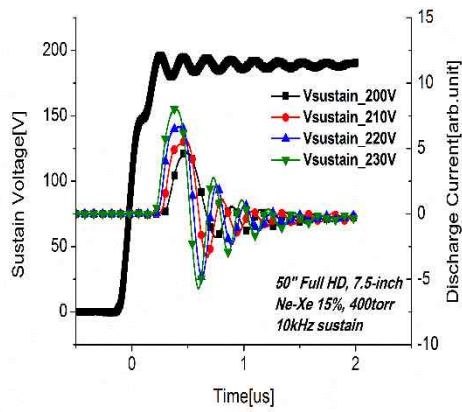
(a)



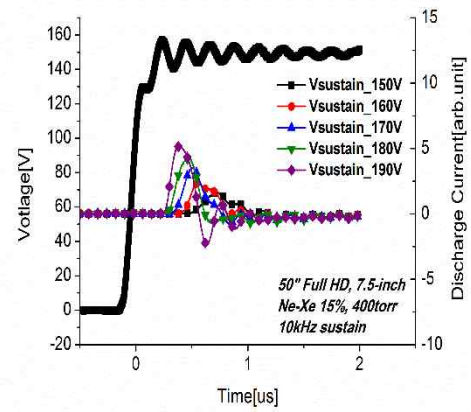
(b)

그림 A.1.5 테스트 패널의 (a) 발광 휘도, (b) 방전 효율

이상으로 선행 연구에서 보여준 실험 결과들을 더 큰 size 의 full white 테스트 패널을 통하여 간단하게 되짚어 보았다. A.2 절과 A.3 절에서는 그동안 다뤄지지 않은 SrO 를 적용한 패널의 구동 특성 및 수명 특성에 대해 자세히 살펴 보도록 하겠다.

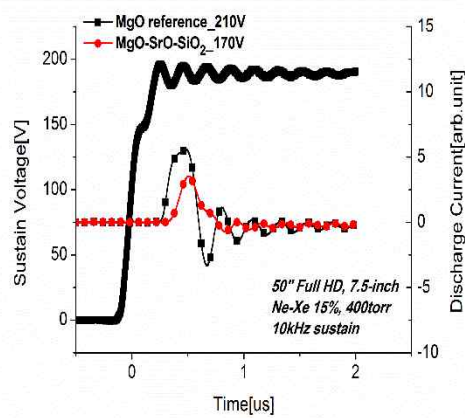


(a) MgO

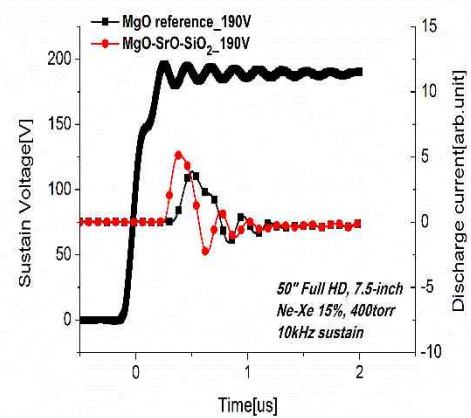


(b) MgO-SrO-SiO<sub>2</sub>

그림 A.1.6 각 테스트 패널에 흐르는 방전 전류



(a) Middle of sustain voltage margin



(b) Same sustain voltage

그림 A.1.7 특정 전압에서 각 테스트 패널에 흐르는 방전 전류 비교

## A.2 SrO 를 적용한 AC PDP 의 구동 특성 연구

### A.2.1 Ramp reset 의 극성에 따른 패널의 reset 방전 특성

AC PDP 는 일반적으로 기입 (Address), 유지 (Sustain), 소거 (Reset) 등의 3단계를 걸쳐 구동이 이루어진다. 상술하면, address 단계는 화상 표시에 필요한 데이터를 입력할 cell 을 선택하는 과정이며 선택된 cell 에 한하여 sustain 단계에서 방전 및 발광이 일어난다. 그리고 sustain 단계에서의 방전이 끝나면 reset 단계로 넘어가 전체 cell 내부의 벽전하를 초기화하여 이전 방전의 결과가 다음 방전에 영향을 주지 않도록 하는데, AC PDP 는 이러한 일련의 과정을 거쳐 매 frame 마다 화상을 표시한다.

그림 A.2.1 에는 AC PDP 의 reset, address 및 sustain 방전을 위한 일반적인 구동 파형이 나타나 있다[93]. 그림에서 보는 것처럼 reset 단계에서는 ramp 형태의 파형을 인가하여 지속적인 약방전을 통해 cell 내부의 벽전하를 제어한다. 파형을 자세히 보면 reset 단계를 크게 전압이 증가하는 구간 (ramp-up period) 과 감소하는 구간 (ramp-down period) 으로 구분할 수 있는데 ramp-up period 에서는 Y 전극이 양극이기 때문에 negative wall charge 가 전극에 축적되는 반면 X 전극 및 A 전극 (Address 전극) 에는 positive wall charge 가 축적된다. 한편, ramp-down period 에서는 X 전극과 Y 전극, Y 전극 과 A 전극 사이에서 지속적인 약방전을 통해 ramp-up period 에서 축적된 전하를 소거해 나간다. 결국, wall charge 의 축적 및 소거가 이루어지는 reset 단계가 종료되면 각 전극에는 address 방전을 위한 매우 적당한 양의 wall charge 만이 남는다.

하지만 위에서 설명한 구동 파형에서는 MgO 혹은 SrO 보호막이 덮인 Y 전극은 양극으로, 형광체가 덮인 A 전극은 음극으로 작용하는데 ion bombardment

에 의한 2차 전자 방출을 유도하고 reset 단계에서 보다 안정적인 방전이 이루어지도록 하기 위해서는 기존과 반대로 Y 전극은 음극으로, A 전극은 양극으로 작용하는 것이 더 바람직하다. 즉, Y 전극에 인가되는 reset 단계의 ramp 파형이 그림과는 반대로 negative potential 을 유지하는 것이 좋을 것으로 예상된다. 이와 관련하여 L. F. Weber[94] 는 Y 전극과 A 전극 간 간격이 X 전극과 Y 전극 간 간격보다 클 경우 reset 단계에서 negative potential 을 가지는 ramp 파형을 인가하여 Y 전극으로부터의 2차 전자 방출을 유도하는 것이 바람직하다고 밝힌 바 있으며 J. Kang 연구 팀은 X 전극과 Y 전극에 인가되는 파형 각각을 potential 이 0 이 되는 지점을 기준으로 뒤집어 negative ramp 형태의 파형을 구현하고 AC PDP 의 구동 특성을 개선한 바 있다[95]-[97]. 결국 negative ramp 를 인가하는 것이 충분한 priming 입자 공급 및 안정적인 약방전 형성에 더욱 도움이 된다는 사실을 알 수 있으며 특히 MgO 대비 2차 전자 방출 계수가 높은 SrO 를 적용한 AC PDP 의 구동에 있어서는 reset 단계에 negative ramp 형태의 파형을 적용하는 것이 매우 중요한 문제가 될 것이다.

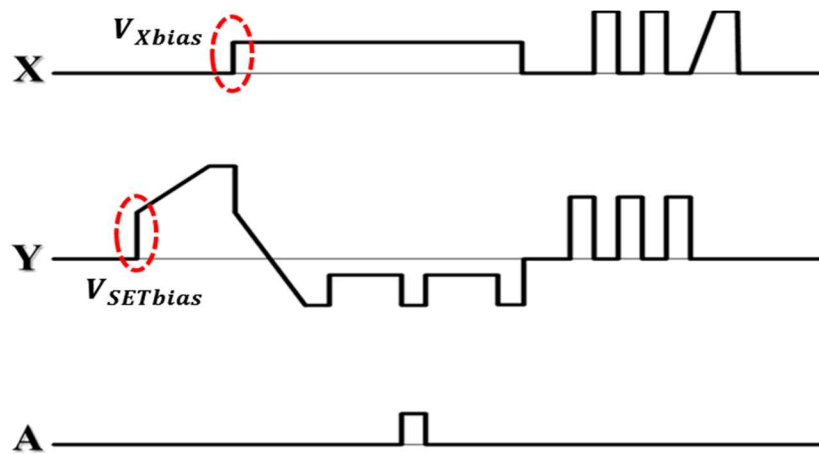
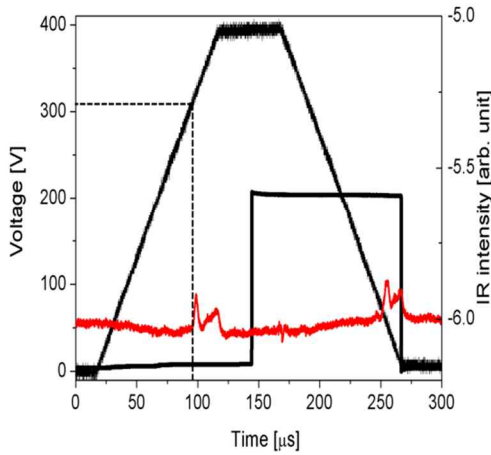
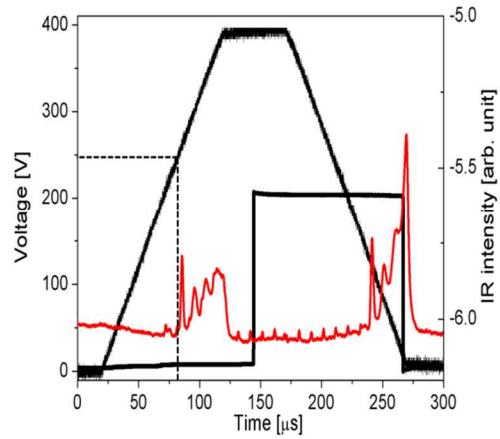


그림 A.2.1 AC PDP 에서 일반적으로 사용되는 구동 파형



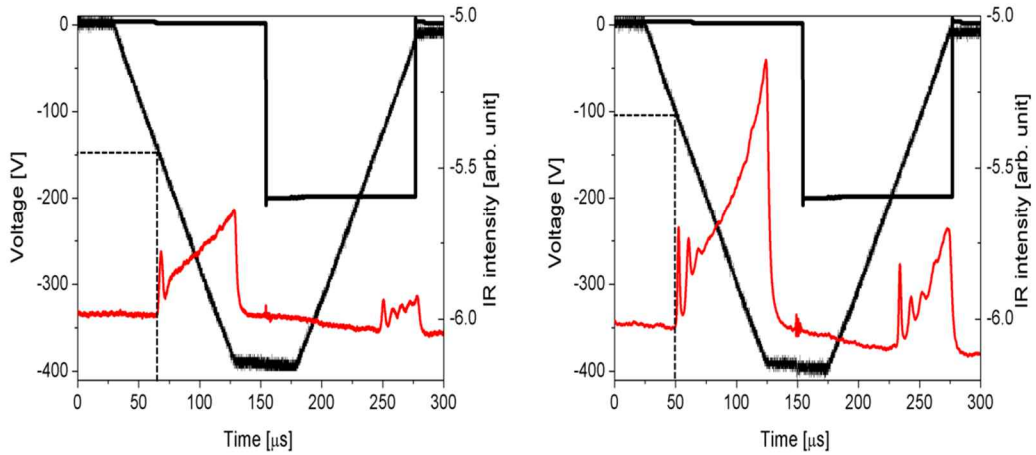
(a) MgO



(b) MgO-SrO-SiO<sub>2</sub>

그림 A.2.2 Positive ramp reset 단계에서 측정된 IR emission

그림 A.2.2 는 FTLAB 에서 제작한 VTC2000 Wave Editor 를 활용해 positive ramp 를 가지는 파형을 디자인한 후 이를 실제 테스트 패널에 적용했을 때 green cell 로부터 측정된 IR emission intensity 를 보여주고 있다. MgO 를 적용한 패널보다는 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 를 적용한 패널의 방전이 빨리 시작되고 있으며 방출되는 IR 의 양 역시 더 많음을 알 수 있다. Negative ramp reset 을 적용한 패널의 경우에도 (그림 A.2.3) 비슷한 경향성을 보여주었다. 특히 그림 A.2.3(b) 를 보면 negative ramp reset 을 적용한 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 약방전 개시 전압 크기가 굉장히 낮고 많은 양의 IR 이 검출되고 있는데 이러한 이유로 인해 reset 단계가 종료된 이후에 Y 전극과 A 전극 간에 축적된 벽전하가 많을 뿐 아니라 결과적으로 형성된 벽전압이 positive ramp reset 을 적용한 패널 대비 높아질 것으로 예상된다. 그리고 이와 같은 효과는 addressing 을 위해 필요한 인가 전압의 감소로 이어질 수 있다.



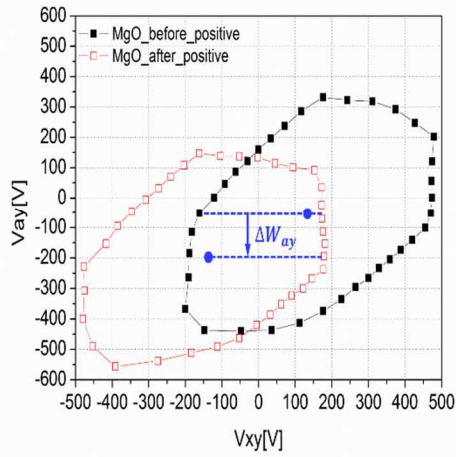
(a) MgO

(b) MgO-SrO-SiO<sub>2</sub>

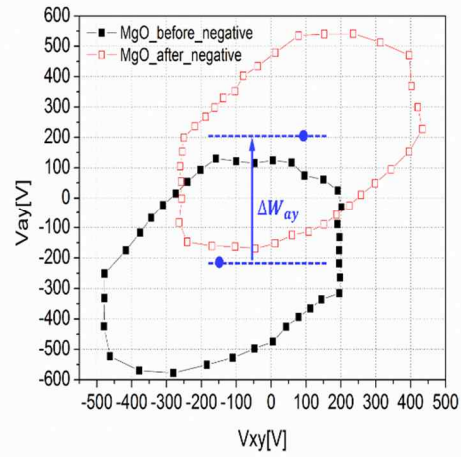
그림 A.2.3 Negative ramp reset 단계에서 측정된 IR emission

실제로 reset 단계 전후의 green cell 의 threshold voltage curve 를 FTLAB 에서 제작한 VTC2000R2 로 측정해 봄으로써 Y 전극 및 A 전극간 벽전압 변화를 파악할 수 있으며 그 결과가 그림 A.2.4 및 그림 A.2.5 에 나타나 있다. MgO 를 적용한 경우 Y 전극과 A 전극 간 벽전압 변화량이 negative ramp reset 에서 더 큰 것을 확인할 수 있으며 특히 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널이 MgO 패널보다 negative ramp reset 을 적용함으로 인한 Y 전극과 A 전극 간 벽전압 변화 정도가 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

전체적으로 살펴 보았을 때, 패널에 negative reset waveform 을 적용하면 약방전이 빠르게 발생하는 동시에 활발하게 일어남을 알 수 있으며 결과적으로 Y 전극과 A 전극 간 형성된 벽전압이 positive reset waveform 보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 상기의 효과가 MgO 패널보다는 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널에서 더욱 두드러지게 나타나고 있다.

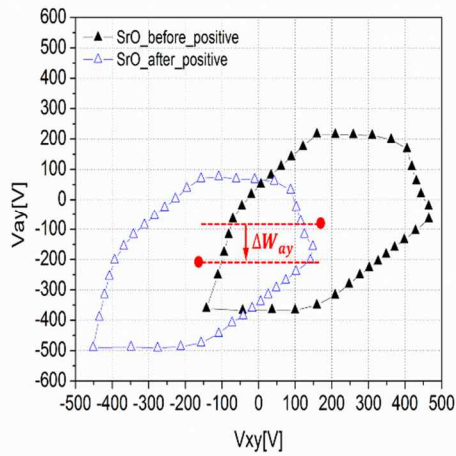


(a) Positive ramp reset

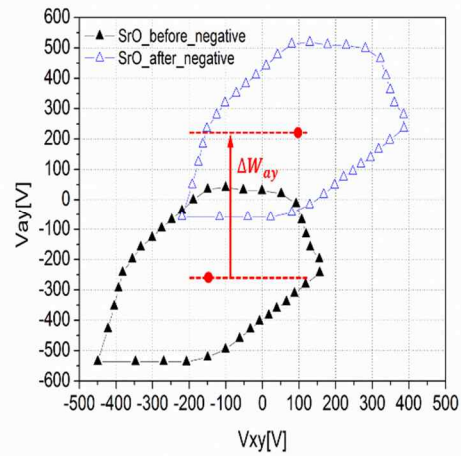


(b) Negative ramp reset

그림 A.2.4 MgO 패널의 Y 전극 및 A 전극 간 벽전압 변화



(a) Positive ramp reset



(b) Negative ramp reset

그림 A.2.5 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 Y 전극 및 A 전극 간 벽전압 변화



### A.2.2 Negative ramp reset 을 적용한 패널의 address 방전 특성

A.2.1 절의 결과를 바탕으로 새롭게 디자인된 파형이 그림 A.2.6 에 나타나 있다. 그림을 보면 X 전극과 Y 전극이 negative potential 을 유지하고 있어 reset 단계에서 A 전극은 양극, X 전극과 Y 전극은 음극으로 작용하는데 이것이 바로 그림 A.2.1 의 파형과의 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다. 또한 그림 A.2.1 에 나타난 기존 파형의 경우 positive ramp 가 Y 전극에서부터 시작하는 반면 제안된 파형에서는 negative ramp 가 X 전극에서부터 시작하는데 이 때문에 address 단계에서 Y 전극은 기존 파형과 동일하게 negative potential 을 유지할 수 있고 A 전극에는 positive pulse 가 적용될 수 있다. 즉 제안된 파형은 기존 파형 대비 reset 단계에서의 ramp 의 극성이나 인가되는 전압의 크기만 다를 뿐, address 및 sustain 단계의 구동 원리는 거의 동일하다. 다만 A.2.1 에서 살펴본 바와 같이, 제안된 파형을 적용함으로 인하여 2차 전자 방출 계수가 높은 신 보호막의 뛰어난 priming 효과를 기대할 수 있다.

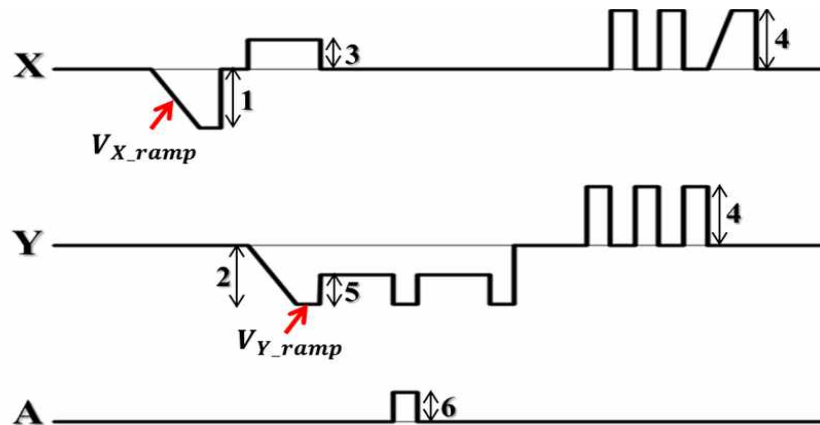


그림 A.2.6 Negative ramp reset 에 기반한 새로운 구동 파형

|            | 1     | 2     | 3   | 4        | 5   | 6   |
|------------|-------|-------|-----|----------|-----|-----|
| MgO Xe 15% | -210V | -210V | 30V | 165~225V | 90V | 60V |
| SrO Xe 15% | -150V | -210V | 30V | 140~190V | 90V | 60V |

표 A.1 MgO 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 전압 인가 조건

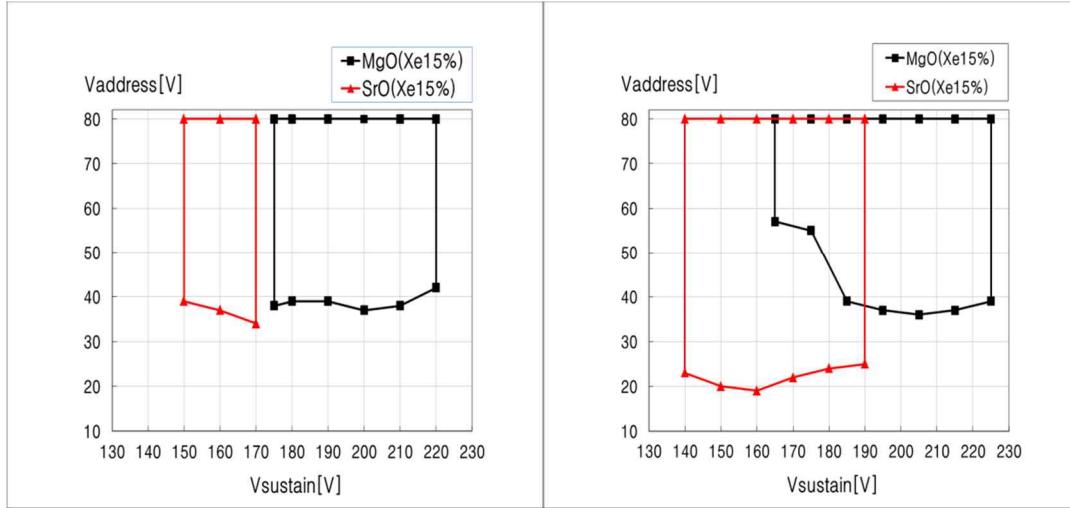
표 A.1 에는 MgO 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 동마진 및 방전 지연 시간 (Address dischrage time lag) 등을 측정하기 위해 사용한 전압 인가 조건이 나타나 있다. Positive ramp reset 의 경우 약방전이 개시되는 전압이 높아 ramp-up period 에서 적게는 300V, 많게는 400V 가까이 전압을 올려야 하는 것이 보통이지만 제안된 파형의 경우 동일한 period 에 인가된 전압의 크기가 절반 수준에 불과하다. 특히 SrO 의 경우 그림 A.2.3(b) 와 같이 negative ramp reset 을 적용했을 때 약방전이 상당히 활발하게 일어나기 때문에 제안된 파형을 동일하게 적용하더라도 MgO 대비  $V_{X\_ramp}$  가 표에서 보는 것처럼 더 작다.

그림 A.2.7 에는 기존 파형 및 제안된 파형을 인가한 테스트 패널의 dynamic voltage margin 이 나타나 있다. 먼저 positive ramp reset 이 적용된 파형을 인가한 경우를 살펴보면 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 최소 방전 유지 전압이 MgO 패널 대비 약 25V 가량 낮다. 하지만 MgO 패널 대비 sustain voltage margin 이 매우 적어 패널의 size 가 증가할 경우 구동 자체가 어려울 수 있다는 문제점이 있다. 또한 각 테스트 패널에서 보여주는 minimum address voltage level 이 거의 유사하다. 이는 그림 A.2.4(a) 및 그림 A.2.5(a) 에 나타난 바와 같이 reset 단계 전후로 MgO 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 Y 전극과 A 전극 간 벽전압의 변화량이 서로 유사한 것과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 그리고 이러한 현상들은 결국 기

존 파형을 테스트 패널에 인가할 경우, 앞에서 설명한 것처럼 SrO 에 의한 더 많은 2차 전자 방출 효과를 기대하기 어렵기 때문에 발생하는 것으로 보인다.

반면, negative ramp reset 이 적용된 파형을 인가한 경우를 살펴보면 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 sustain voltage margin 이 positive ramp reset 대비 2배 이상 증가하였다. 주목할만한 사실은 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 sustain voltage margin 을 MgO 패널과 동등한 수준으로 확보함과 동시에 minimum address voltage level 은 MgO 패널 대비 10V 이상 낮아졌다는 점이다. 이는 negative ramp reset 의 적용을 통해 reset 단계 전후로 Y 전극과 A 전극간 벽전압이 크게 증가한 A.2.5(b) 의 결과와 일맥 상통한다고 볼 수 있다. MgO 패널의 경우에도 negative ramp reset 을 적용한 파형을 인가함으로써 sustain voltage margin 이 증가하고 방전 유지 전압이 높은 영역에서 minimum address voltage level 이 소폭 감소하였지만 그 효과는 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널 대비 그리 뚜렷하지 않았다. 이는 결국 2차 전자 방출 계수가 높은 보호막을 PDP 에 적용할 경우 reset 단계에서 Y 전극을 음극으로 활용하는 것이 더욱 효과적이라는 사실을 의미한다.

다만 negative reset waveform 의 적용으로 인해 약방전이 활발히 일어나면서 패널의 background luminance 가 증가할 우려가 있어 각 테스트 패널에 1 sub-field 동안 64쌍의 sustain pulse 를 인가하고 address voltage 를 60V 로 설정했을 때 테스트 패널로부터 발생하는 background luminance 를 그림 A.2.8 과 같이 실제로 측정해 보았다. 각 테스트 패널의 방전 유지 전압이 높은 영역에서 negative reset waveform 의 적용으로 인해 background luminance 가 positive reset waveform 대비 증가하긴 했지만 증가폭이 미미하다. 특히 SrO 패널의 경우 150~170V 의 방전 유지 전압에서 background luminance 의 증가율은 5% 미만에 불과했다. 이는 negative reset waveform 에서 약방전이 활발하게 발생하더라도 인가된  $V_{X\_ramp}$  혹은  $V_{Y\_ramp}$  이 워낙 작기 때문인 것으로 보인다.



(a) Positive ramp reset

(b) Negative ramp reset

그림 A.2.7 인가한 구동 파형에 따른 테스트 패널의 dynamic voltage margin

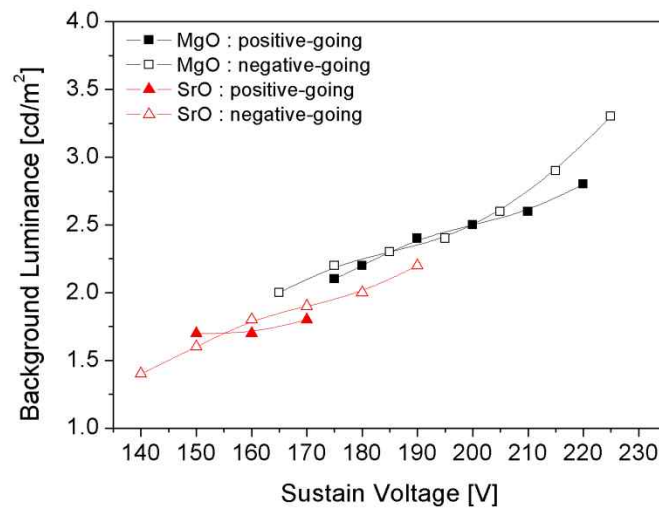
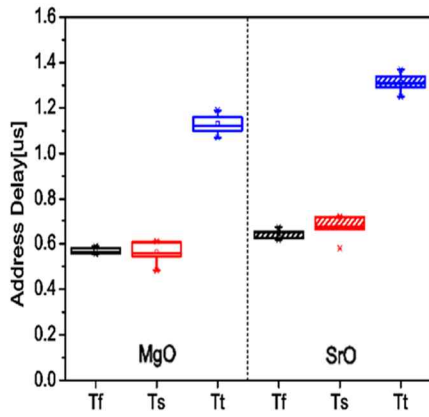
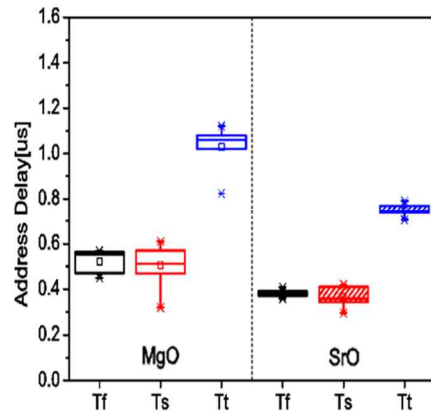


그림 A.2.8 MgO 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 background luminance



(a) Positive ramp reset



(b) Negative ramp reset

그림 A.2.9 인가한 구동 파형에 따른 테스트 패널의 address discharge time lag

한편, address discharge time lag 를 줄이는 것도 negative reset waveform 을 적용했을 때 얻을 수 있는 중요한 효과 중의 하나이다. 그림 A.2.9 에는 기존 파형과 제안된 파형을 각 테스트 패널에 인가했을 때 green cell 에서 측정된 형성 지연 시간 ( $T_f$  : Formative time lag), 통계적 지연 시간 ( $T_s$  : Statistical time lag) 및 total address discharge time lag 가 나타나 있다. 측정을 위해 각 테스트 패널의 방전 유지 전압은 sustain voltage margin 의 중간값을 이용하였으며 address voltage 는 60V 로 고정하였다. Positive ramp reset 파형을 적용한 경우 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의  $T_f$  가 MgO 패널 대비 100ns 가량 높았지만 negative ramp reset 을 적용하면서  $T_f$  가 큰 폭으로 감소하는데 이는 reset 단계 전후의 Y 전극과 A 전극간 벽전압의 변화량이 그만큼 증가하였기 때문이다. MgO 패널 역시 동일한 현상을 보여주고 있지만  $T_f$  의 감소폭이 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널만큼 뚜렷하지 않다. Negative ramp reset 의 적용으로 인한  $T_s$  의 감소 효과 역시 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널

에서 더 뚜렷하게 나타났다. 결과적으로 negative ramp reset 을 적용할 때 MgO 패널은 total address discharge time lag 가 positive ramp reset 대비 200ns 정도 줄어든 반면 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널은 무려 550ns 이상 단축된 결과를 얻을 수 있었다.

종합적으로 살펴보았을 때, negative ramp reset 을 적용할 경우 ramp-up period 에서 활발한 약방전으로 인해 다량의 벽전하가 축적되어 reset 단계 전후로 Y 전극과 A 전극간 벽전압이 증가한다. 이로 인해 address 단계에서 addressing 을 위한 minimum voltage 가 낮아지고 address discharge time lag 가 감소한다. 또한 충분한 sustain voltage margin 이 확보될 수 있어 안정적인 구동이 가능한데 이러한 모든 효과는 2차 전자 방출 계수가 높은 신 보호막을 적용한 PDP 에서 더 뚜렷하게 나타났다.

### A.3 SrO 를 적용한 AC PDP 의 수명 특성 연구

A.1 절 및 A.2 절에서 살펴본 바와 같이 신 보호막을 AC PDP 에 적용할 경우 방전 전압을 낮추고 발광 효율을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 적절한 파형 설계를 통해 구동 특성까지 개선할 수 있다. 하지만 MgO 의 대체 물질로서 연구가 된 SrO, CaO 혹은 SrCaO 와 같은 물질의 경우 ion bombardment 에 의한 sputter yield 가 높아 수명 특성이 약하다는 단점이 지적되어 왔다[90]. 이와 관련하여 A.3 절에서는 MgO 패널 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널에 대해 각 테스트 패널의 sustain voltage margin 의 중간값을 인가하여 3000시간 이상 방전을 진행했을 때 나타난 수명 특성 결과들을 간단히 소개하고자 한다.

먼저 그림 A.3.1 은 MgO 패널 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 방전 개시 전압 및 최소 방전 유지 전압을 시간에 따라 측정한 결과를 나타내고 있다. Frequency 10kHz, duty ratio 50% 인 파형을 X 전극 및 Y 전극에 인가하여 측정하였으며 3000시간이 지난 후에도 MgO 패널 대비 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 낮은 방전 전압 특성이 유지되고 있음을 알 수 있다. 한편, 각 패널의 sustain voltage margin 의 중간값에서 시간에 따른 발광 휘도 및 발광 효율을 측정한 결과가 그림 A.3.2 에 나타나 있다. 3000 시간 방전이 진행되는 동안 방전 전압은 유지가 되고 있으나 발광 휘도 및 발광 효율은 MgO 패널 및 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널 모두 시간에 따라 감소하고 있다. 다만 예상과 달리 ion 에 대한 sputter yield 가 높은 SrO 를 적용한 패널이 MgO 패널 대비 휘도나 효율의 감소율이 크지 않은데 이는 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 sustain voltage margin 의 중간값이 MgO 패널 대비 낮아 상대적으로 ion energy 가 감소하기 때문인 것으로 보인다.

그림 A.3.4 는 3000시간 까지 측정된 휘도 결과를 바탕으로 외삽법을 활용하여 추정된 패널의 예상 수명을 보여주고 있다. 통상적으로 패널의 수명은 초기

회도가 반으로 감소할 때까지 걸리는 시간으로 정의하는데 이에 따르면 sputter yield 가 낮은 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 수명이 MgO 패널보다 오히려 약간 더 길다. 물론 MgO 와 같은 크기의 전압을 인가하면 MgO-SrO-SiO<sub>2</sub> 패널의 수명이 훨씬 단축되겠지만 각 패널의 방전 유지 전압 범위가 다르기 때문에 이를 고려해야 좀 더 객관적인 수명 특성 비교가 가능하다고 생각된다. 따라서 SrO 의 sputter yield 가 높다고 할지라도 실험에서 보여지는 패널의 수명 특성은 MgO 패널 대비 동등 이상으로 판단할 수 있다.



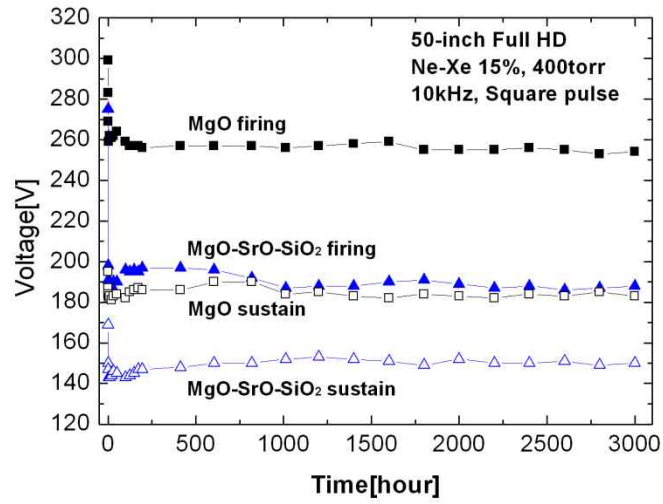
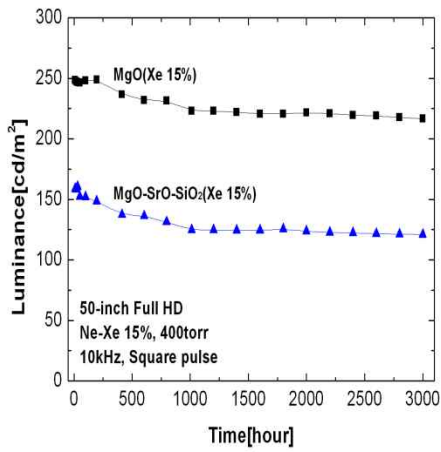
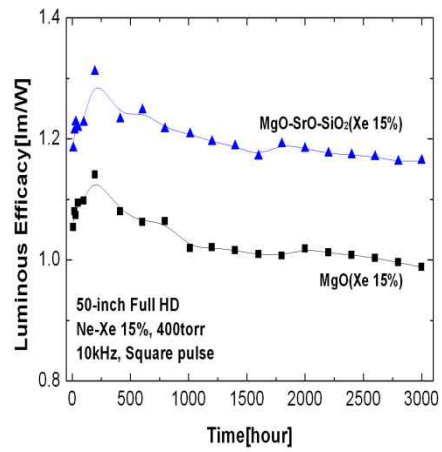


그림 A.3.1 테스트 패널의 방전 시간에 따른 전압 변화



(a)



(b)

그림 A.3.2 테스트 패널의 방전 시간에 따른 (a) 발광 휘도, (b) 발광 효율

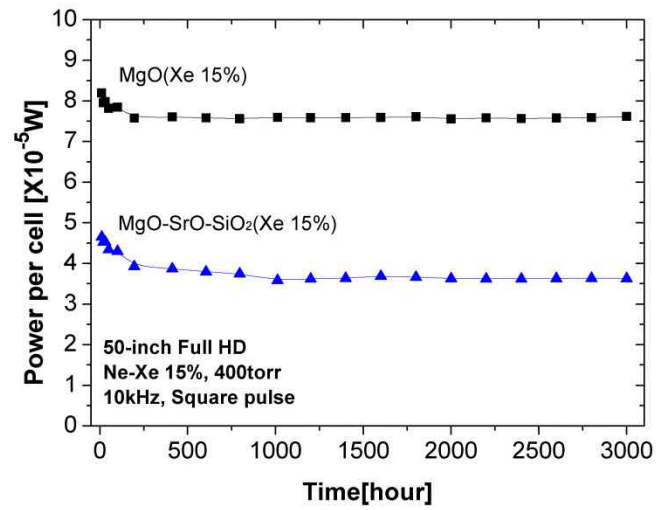


그림 A.3.3 테스트 패널의 방전 시간에 따른 단위 cell 당 파워 소모량

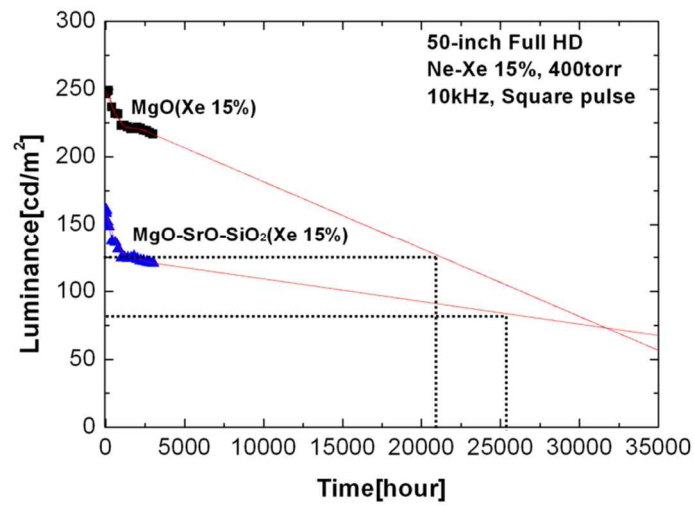


그림 A.3.4 외삽법으로 추정된 각 패널의 예상 수명

## A.4 요약

부록에서는 건식 식각 공정 외에 Glow discharge 에 의해 형성된 플라즈마를 활용하는 또다른 대표적인 응용 분야인 AC PDP 의 구동 특성 및 수명 특성에 대하여 살펴 보았다. Electron affinity 및 band-gap energy 가 낮은 SrO 를 적용한 PDP 의 경우 MgO PDP 대비 구동 전압이 낮고 발광 효율이 큰 폭으로 개선될 수 있음은 널리 알려져 있지만 그 구동 특성에 대해서는 알려진 바가 거의 없었다. 특히 3D PDP 에서 가장 중요한 이슈는 패널의 response time 단축인데, 이와 관련하여 본 연구에서는 신 보호막을 적용한 PDP 의 address discharge time lag 를 획기적으로 개선할 수 있는 새로운 구동 파형을 제안하였다.

실험 결과, 기존에 쓰이는 구동 파형을 SrO PDP 에 적용할 경우 reset 단계에서 보호막이 덮인 Y 전극이 양극으로 작용하기 때문에 2차 전자 방출 계수가 높은 SrO 에 의한 충분한 priming 효과를 얻을 수 없었다. Sustain voltage margin 은 안정적인 구동이 가능할 만큼 충분히 확보되지 못하였으며 address discharge time lag 도 상당히 길었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 reset 단계에서 Y 전극을 음극으로 활용하여 SrO 의 priming 효과를 극대화할 수 있는 새로운 파형을 제안하였으며 그 결과 SrO PDP 의 sustain voltage margin 을 충분히 확보함은 물론 addressing 에 필요한 전압을 낮추고 무엇보다 address discharge time lag 를 획기적으로 줄일 수 있었다.

한편, 신 보호막은 sputter yield 가 높아 수명이 충분히 길지 않다는 기존의 지적이 있어 각 테스트 패널에 sustain voltage margin 의 중간값을 인가하여 3000 시간 이상 방전을 진행하면서 수명 특성을 비교 평가해 보았다. 그 결과 SrO PDP 의 수명 특성이 MgO PDP 대비 동등 이상으로 확인되었는데 이는 SrO 의 sputter yield 가 MgO 대비 높더라도 SrO PDP 의 동작 전압 범위가 낮기 때문에

ion 의 energy 가 MgO PDP 대비 감소했기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 SrO 와 같은 신 보호막을 PDP 에 적용할 경우 오랜 기간 PDP 의 단점으로 지적되어 온 낮은 효율 및 높은 전력 소비량을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 적절한 파형 설계를 통해 구동 특성도 개선될 수 있기 때문에 이와 관련하여 향후 좀 더 심도 있는 연구가 진행될 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol.1: Plasma Physics, 2<sup>nd</sup> Ed. Plenum Press, New York and London, Chap. 1, 1984
- [2] A. Von Angel, *Ionized Gases*, Oxford University Press, 1965
- [3] 최경철, “비방전 보조 펄스를 이용한 직류 플라즈마 디스플레이 채널의 특성”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1993
- [4] V. E. Golant, V. I. Fedrov, *RF Heating in Toroidal Fusion Devices*, Plenum Press, New York, 1989
- [5] 이홍식, “JET 플라즈마의 ICRH 에 의한 공명 이온 가열에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1990
- [6] A. Grill, *Cold Plasma in Material Processing*, IEEE Press, New York, 1993
- [7] A. M. Voshchenkov, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (4), pp. 1211 (1993)
- [8] W. Kratschmer et al., *Nature*, **170**, pp. 167 (1990)
- [9] D. L. Smith, *Thin-Film Deposition Principles & Practice*, McGraw-Hill, 1995

- [10] 태홍식, “초고진공 전자 싸이클로트론 공명 플라즈마 화학 기상 증착에 의한 저온 실리콘 단결정 성장 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1990
- [11] E. L. Neauss, *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 22, No. 1, pp. 2 (1994)
- [12] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 9, 176 (2005)
- [13] S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo and W. D. Westwood, *Handbook of Plasma Processing Technology*, Noyes Publications. 1990.
- [14] H Abe, M Yoneda and N Fujiwara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, pp. 1435 (2008)
- [15] 김홍습, “Etch 장비 기술 동향”, *반도체 산업*, 제 **12** 월호, pp. 34-36 (2011)
- [16] R. H. Bruce and A. R. Reinberg, *Proc. 2<sup>nd</sup> Symp. Dry Process*, pp. 131 (1980)
- [17] K. Ono, T. Oomori, M. Tuda and K. Namba, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, pp. 1071 (1992)
- [18] 엄근영, *플라즈마 식각기술*, 미래컴, pp. 11, Chap. 7, 2006
- [19] J. Hopwood, C. R. Guarinieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, pp. 147 (1993)

- [20] 한국 전자 통신 연구소, “고밀도 건식 식각 기술에 관한 연구 (최종 보고서)”, 2000
- [21] Tsai W, Mueller G, Lindquist R, Frazier B and Vahedi V, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, pp. 3276 (1996)
- [22] M A Lieberman, J P Booth, P Chabert, J M Rax and M M Turner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, pp. A283 (2002)
- [23] Raizer Y P, Schneider M N and Yatsenko N A 1995 *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (Boca Raton, FL: CRC Press)
- [24] M. Takai et al. *J. Non-Cryst. Solids* 266-269 (2000) **90**
- [25] 도현호, “전자 회전 공명 플라즈마 식각 장치에서의 산화막 식각 특성 및 식각 구조에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1997
- [26] 이호준, “자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1996
- [27] D. Cheng, D. Maydan, S. Somekh, K. R. Stalder, D. L. Andrews, M. Chang, J. M. White, J. Y.Wong, V. J. Zeitlin, and D. N.Wang, U.S. Patent No. 5,215,619.
- [28] <https://www.crystec.com/triashe.htm>

- [29] R. W. Boswell, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **26**, pp. 1147 (1984)
- [30] C. Hedlund, H.O. Blom, and S. Berg, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, pp. 1962 (1994)
- [31] K. Nojiri and E. Iguchi, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13**, pp. 1451 (1995)
- [32] T. Akimoto, H. Nanbu, and E. Ikawa, *J. Vac. Sci. Technol. B* **13**, pp. 2390 (1995)
- [33] 김혁, “다양한 진단 방법을 이용한 약자장이 걸린 유도 결합 플라즈마에 대한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 2013
- [34] B. E. Cherrington, *Gaseous Electronics and Gas Lasers*, Pergamon Press (1979)
- [35] N. A. Krall and A. W. Trivelpiece, “Principles of Plasma Physics”, McGraw-HILL, 1973
- [36] David K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> Ed. ADDISON-WESLEY, Chap. 6, 1989
- [37] [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)
- [38] <http://ko.wikipedia.org/wiki/유한요소법>
- [39] <http://www.wangkang.co.kr>



- [40] A. B. Mikhailovskii, Theory of Plasma Instabilities, Volume 2: Instabilities of an Inhomogeneous Plasma (Consultants Bureau, New York, 1974)
- [41] Yong-ik Sung, H. B. Lim and R. S. Houk, “Diagnostic studies of a low-pressure inductively coupled plasma in argon using a double Langmuir probe”, *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 17, pp. 565-569, 2002.
- [42] M. YOSHIKAWA, et al., *Plasma Fusion Res*, **2**, S1036 (2007)
- [43] Y. MIYATA et al., *Trans. Fusion. Tech.* **55**, 168 (2009)
- [44] C. W. Chung, S. S. Kim, and H. Y. Chang, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 095002 (2002)
- [45] C. W. Chung, S. S. Kim, and H. Y. Chang, *Phys. Rev. E.* **69**, 016406 (2004)
- [46] V. A. Godyak and V. I. Kolobov, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 369 (1998)
- [47] I. W. Rangelow, *J. Vac. Sci. Technol. A* **21** pp. 1550 (2003)
- [48] C. J. Mogab, *J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology*, **Vol. 124, No. 8**, pp. 1262 (1977)
- [49] 박완재, “응용 공정별 맞춤형 플라즈마 건식 식각에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 2012

- [50] I. W. Rangelow, *J. Vac. Sci. Technol. A* **21** pp. 1550 (2003)
- [51] M. Schaepkens and G. S. Oehrlein, *Appl. Phys. Lett.* **72**, pp. 1293 (1998)
- [52] O. Jourbert, G. S. Oehrlein and Y. Zahng, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, pp. 658 (1994)
- [53] E. S. G. Shaqfeh and C. W. Jurgensen, *J. Appl. Phys.* **66** pp. 4664 (1989)
- [54] K. P. Giapis, G. R. Scheller, R. A. Gottscho, W. S. Hobson and Y. H. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **57** pp. 983 (1990)
- [55] J. W. Coburn and H. F. Winters, *Appl. Phys. Lett.* **55** pp. 2730 (1989)
- [56] J. C. Arnold and H. H. Sawinl, *J. Appl. Phys.* **70** pp. 5314 (1991)
- [57] S. Dushman, *Scientific Foundation of Vacuum Technique*, 3<sup>rd</sup> ed. Wiley & Sons Inc., New York, pp. 98-99 (1955)
- [58] Melisa J. Buie, Jeremiah T. P. Pender and Peter L. G. Ventzek, *J. Appl. Phys.* **66** pp. 4838 (1997)
- [59] Shin-ichi Imai, *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**, pp. 2008 (2008)
- [60] M. Natsui, T. Tatsumi and M. Sekine, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, pp. A202 (2002)

- [61] T. Fukasawa, K. Kubota, H. Shindo and Y. Horiike, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, pp. 7042, (1994)
  
- [62] A. C. Westerheim, A. H. Labun, J. H. Dubash, J. C. Arnold, H. H. Sawin and V. Yu-Wang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13**, pp. 853 (1995)
  
- [63] H. H. Doh, C. K. Yeon, and K. W. Whang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15**, pp. 664 (1997)
  
- [64] Y. H. Lee and Z. H. Zhou, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 138, No. 8, pp. 2439 (1991)
  
- [65] O. Joubert, G. S. Oehrlein, and Y. Zhang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, pp. 658 (1994)
  
- [66] O. Joubert, G. S. Oehrlein, and M. Surendra, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, pp. 665 (1994)
  
- [67] O. Joubert, G. S. Oehrlein, M. Surendra, and Y. Zhang, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, pp. 1957 (1994)
  
- [68] K. Siozawa, K. Tabaru, T. Maruyama, N. Fujiwara and M. Yoneda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, pp. 2483, (1996)
  
- [69] S. Hosomi and N. Omori, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15**, pp. 585 (1997)
  
- [70] Y. S. Kim, Peter Ta-Chin Wei, George R. Tynan, Robert Charatan and Dave Hemker, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, pp. 327, (1998)

- [71] S. S. Kim, C. S. Chang, N. S. Yoon, and K. W. Whang, *Phys. Plasmas* **6**, 2926 (1999)
  
- [72] F.F. Chen, *Electric Probes*, in "Plasma Diagnostic Techniques", ed. by R.H. Huddleston and S.L. Leonard (Academic Press, New York), 1965.
  
- [73] J. W. Coburn and M. Chen, "Optical emission spectroscopy of reactive plasmas: A method for correlating emission intensities to reactive particle density", *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 6, pp.3134-3136, 1980.
  
- [74] J. Ding, J.S. Jenq, G.H. Kim, H. L. Maynard, J. S. Hamers, N. Hershkowitz, and J. W. Taylor, "Etching rate characterization of SiO<sub>2</sub> and Si using ion energy flux and atomic fluorine density in a CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar electron cyclotron resonance plasma", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 11, pp. 1283-1288, 1993.
  
- [75] George Kokkoris, Andy Goodyear, Mike Cooke and Evangelos Gogolides, "A global model for C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> plasmas coupling gas phase and wall surface reaction kinetics", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 41, pp. 195211-1-195211-12, 2008.
  
- [76] Woohyun Lee, Hyuk Kim, Jiwon Kim, Hee-Woon Cheong, Il Gyo Koo, Soojin Lee, Hyo-Seong Seong and Ki-Woong Whang, "Measurement of Ion Energy Distribution in Magnetized ICP using Multi-channel Ion Energy Analyzer", in *Proc. of GEC*, 2013.

- [77] Hirotaka Toyoda, Makoto Iio and Hideo Sugai, "Cross Section Measurements for Electron-Impact Dissociation of C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> into Neutral and Ionic Radicals", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, pp. 3730-3735, 1997.
- [78] S. Mikoshiba, "Color plasma displays", *Information Display*, vol. 10, pp. 21-23, 1994/
- [79] L. F. Weber, "The performance and promise of color plasma displays" in *Proc. of Asia Display*, p.373, 1995.
- [80] K. W. Whang, H. W. Cheong, B. J. Oh, T. H. Lee and O. Kwon, "Realization of Ultra-High Luminous Efficacy PDP", in *Proc. Of China Display / Asia Display*, pp.256-259, 2011.
- [81] Nam Hoon Shin, Kyo Sung Lee, Sang Cheol Song, Bhum Jae Shin and Kyung Cheol Choi, "High Luminous efficiency AC PDP with auxiliary electrodes", p. 1457, in *Proc. Int. Display Workshop*, 2005.
- [82] Joon Yeon Kim, Jeong Doo Yi, Min Hur, Tae Woo Kim, Hyun Go Heo, Sung Chun Cho, Byoung Min Chun, Hak Cheol Yang, Jeong Nam Kim and Yoon Hyoung Cho, "A New Structure and Driving Scheme for High Luminous efficiency in WXGA PDPs", p. 1134, *SID Int. Symp. Dig.*, 2005.

- [83] H. Ajiki, Y. Negoro, S. Kitazawa, K. Mogi, Y. Shiozaki, K. Yahagi, E. Otani, H. Taniguchi, S. Iwaoka, N. Saegusa and K. Amemiya, “High Luminous Efficiency and Low Black Luminance AC PDP with Address Space Separation Cell Structure”, p. 1789, in *Proc. Int. Display Workshop*, 2006.
- [84] Hae-Yoon Jung, Tae Jun Kim, Jong-Keun Lim and Ki-Woong Whang, “A new DIDE cell structure for high luminous efficacy and low voltage driving of PDP”, p. 1181, in *Proc. Int. Display Workshop*, 2006.
- [85] H. Uchiike, K. Miura, N. Nakayama, T. Shinoda, and Y. Fukushima, “Secondary electron emission characteristics of dielectric materials in AC-operated plasma display panels,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-23, no. 11, pp. 1211–1217, 1976.
- [86] T. J. Vink, A. R. Balkenende, R. G. F. A. Verbeek, H. A. M. van Hal, and S. T. de Zwart, “Materials with a high secondary-electron yield for use in plasma displays,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 12, pp. 2216–2218, 2002.
- [87] G. Uchida, S. Uchida, H. Kajiyama, and T. Shinoda, “Characteristics of a micro dielectric barrier discharge ignited by a cold cathode with high ioninduced secondary electron emission for plasma display panel,” *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 9, pp. 093301-1–093301-6, 2009.
- [88] H. Y. Jung, T. H. Lee, H. W. Cheong, S. O. Steinmuller, J. Janek, and K. W. Whang, “Realization of high luminous efficacy at low voltages in the plasma display with SrO–MgO double layer,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 7, pp. 686–688, Jul. 2010.

- [89] O. Kwon, H. S. Bae, H. Y. Jung, T. H. Lee, H. W. Cheong, and K. W. Whang, "Mechanism of high luminous efficacy in plasma display panel with high secondary electron emission coefficient cathode material analyzed through 3-D fluid model simulation," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 4, pp. 043303-1–043303-6, Aug. 2011.
- [90] Y. Motoyama, Y. Murakami, M. Seki, T. Kurauchi, and N. Kikuchi, "SrCaO protective layer for high-efficiency PDPs," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 54, no. 6, pp. 1308–1314, Jun. 2007.
- [91] K. W. Whang, T. H. Lee, H. W. Cheong, S. O. Steinmuller, and J. Janek, "The role of the impurity diffusion barrier for the cathode material in AC PDP," *SID'11 Technical Digest*, 2011, pp. 505-507.
- [92] 이태호, "교류형 플라즈마 디스플레이의 저전압 및 고효율 특성 향상에 영향을 미치는 물질에 관한 연구", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 2012
- [93] L. F. Weber, "Plasma display device challenges," in *Proc. Asia Display, Int. Display Res. Conf.*, Seoul, Korea, 1998, pp. 15–27.
- [94] L. F. Weber, "Positive column plasma display," US Patent 6 184 848, Feb. 2001.
- [95] W. H. Park, S. J. Lee, J. Y. Lee, and J. Kang, "Improvement of address discharge time-lag with a positive scan-bias in negative waveform," in *Proc. IDW*, pp. 947–950, 2009.

- [96] S. Lee, H. Shin, and J. Kang, "Jitter Characteristics of Positive and Negative Waveforms Investigated With HD and Full-HD Panels," in *Proc. SID*, pp. 1572–1575, 2010.
- [97] H. Choi, M. Oh, and J. Kang, "A new reset waveform with negative ramp pulse in ac PDP," in *Proc. ASID*, pp. 366–368, 2006.



## ABSTRACT

The degree of integration in semiconductor devices has been increasing for decades. In addition, the impending era of 450mm wafers and the increase in the aspect ratio of contact hole due to design rule shrinkage make the requirements of dry etchers more stringent. Plasma etchers should still guarantee a high degree of radial uniformity of plasma density although the area of a 450mm wafer is more than twice as large as a 300mm wafer. It is needless to say that a high etch rate of etching materials and selective dry etching are required as next generation plasma etcher in order to improve the productivity of semiconductor devices. Furthermore, aspect ratio dependent etching (ARDE), or reactive ion etching lag (RIE lag) of patterned materials with different aspect ratios should be controlled. In this regard, a number of high performance plasma etchers have been developed or are currently under development. Most of all, a magnetized inductively coupled plasma (M-ICP) is known to generate high density plasma and guarantee a high etch rate of etching materials by applying a weak magnetic field to an inductively coupled plasma (ICP). However, the research on optimization in spatial distribution of the magnetic field that maximizes plasma density and enhances the radial uniformity of plasma density had not been studied extensively. Moreover, the dry etching characteristics of patterns with high aspect ratio including the etch rate, selectivity and RIE lag in M-ICP etcher had not been observed thoroughly and the etching mechanism of materials in M-ICP is not clear yet.

This research investigates various spatial distributions of the magnetic field and the most desirable magnetic field configuration which can be generated from multiple pairs of electromagnets. Firstly, the number of turns of copper wire wound on the bobbin, direction

of current flow and the current intensity applied to each electromagnet, a diameter of each electromagnet and the distance between the electromagnet and the substrate were determined based on Biot-Savart law and FEMM 4.2, a free software tool for the analysis of the spatial distribution of magnetic fields. Secondly, the radial and axial distributions of the magnetic field were investigated by FEMM and gaussmeter when direction of current flow was same for all electromagnets. It was confirmed that the resultant spatial distribution of magnetic field was right on target and simulational results were in good agreement with experimental results. Lastly, the current intensity and direction of current flow of each electromagnet were altered in order to optimize the magnetic field distribution. Theoretically, it is desirable that the magnetic flux density should increase in both radial and axial directions in order not to induce the flute instability of plasma and to make R-wave propagate into the process chamber. In this regard, seven types of spatial distributions of the magnetic field were generated including the case mentioned above. Based on the plasma density and electron temperature measured by dual Langmuir probe (DLP), it was confirmed that plasma density was maximum and radial uniformity of plasma was good when magnetic flux density increases in both radial and axial directions. Meanwhile, electron temperature right above the substrate in M-ICP was trivially higher than one in ICP.

This research also investigates the dry etching characteristics of oxide-based HARC in M-ICP etcher. Basically, ACL-to-Oxide selectivity as well as the etch rate of ACL and oxide was determined. In addition, the change in top, bowing and bottom CDs before and after oxide etching was observed. More importantly, the RIE lag characteristics of oxide-based HARC whose top CD is varied from 90nm to 200nm were investigated according to various process parameters such as bias frequency, magnetic flux density, neutral gas

pressure, bias power, source power and gas mixture ratio. It was confirmed that oxide etch rate in M-ICP was more than three times higher than one in ICP and ACL-to-Oxide selectivity also increased by 44%. Moreover, it was confirmed that the RIE lag of HARC could be reduced to less than 6% by adjusting the magnetic flux density on the substrate and neutral gas pressure properly. In particular, lowering neutral gas pressure to 0.067Pa (0.5mT) was helpful to make vertical profile and reduce the RIE lag. Meanwhile, the mechanism of the RIE lag of oxide-based HARC in M-ICP etcher was clearly understood by measuring plasma density and electron temperature with DLP, ion energy distribution (IED) and ion flux with ion energy analyzer (IEA) and radical density with actinometric optical emission spectroscopy (A-OES).

If the dry etching is representative of plasma application in the area of semiconductor, PDP (Plasma Display Panel) is another representative of plasma application in the field of flat panel display. PDP is self-emissive display device and has a lot of merits such as wide viewing angle, high-quality image and so on. AC PDP was first developed by the research group in the university of Illinois in 1964 and Japanese companies first released commercial PDP TVs in the early 1990s. Domestic companies also broke into PDP TV market in the late 1990s and since then they have actively competed with Japanese companies in order to increase market share. Chinese companies has also invested in PDP TV in recent years. Unfortunately, however, PDP TV market is shrinking due to aggressively marketed products such as LCD and OLED TVs. Eventually, Panasosic decided to withdraw from PDP market in 2013 and domestic companies such as Samsung SDI and LG electronics are leading the market with Chinese companies in hot pursuit.

The most important reason of the shrinkage in PDP TV market is that the luminous efficacy of PDP is low and the resultant power consumption is high compared to other

display devices. Moreover, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) has been regulating the power consumption of home appliances more and more strictly. Fortunately, it has been reported that the luminous efficacy of PDP could be remarkably improved by using new protective layers with higher secondary electron emission coefficient, which make a significant breakthrough in a survival from market competition. However, most reports are focused on luminous efficacy of PDP with new protective layer and there are very few reports which investigate the address discharge characteristic of PDP with new protective layer. We must understand that short response time is no less important than the luminous efficacy since it is one of the most crucial factors in the realization of high quality three-dimensional images in 3D PDP. In this study, therefore, the address discharge characteristics of PDP with new protective layer were thoroughly investigated. In addition, new driving waveform was designed and proposed in order to reduce the address discharge time lag of PDP with new protective layer. As a result, the address discharge time lag of PDP with new protective layer and suggested waveform decreases by more than 550ns compared to PDP with new protective layer and the conventional waveform. Moreover, it was confirmed that the lifetime of test panel with new protective layer was superior to test panel with the conventional MgO layer.

**Keywords:** Plasma density, electron temperature, DLP (Dual Langmuir Probe), R-wave, ICP (Inductively Coupled Plasma), M-ICP (Magnetized ICP), HARC (High Aspect Ratio Contact hole), Oxide etch rate, ACL-to-Oxide selectivity, RIE lag, Top CD, Bowing CD, SLP (Single Langmuir Probe), EEPF (Electron Energy Probability Function), IED (Ion Energy Distribution), Ion flux, A-OES (Actinometric Optical

Emission Spectroscopy), PDP (Plasma Display Panel), Luminance, Luminous efficacy, sustain voltage margin, formative delay, statistical delay, address discharge time lag, lifetime

**Student number:** 2009-30211